

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Disertační práce**

Metody řízení asynchronního motoru v pohonné jednotce  
silničního vozidla

Control Methods of an Induction Motor in Vehicle Drive Unit

Školitel: doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.

2012

Ing. David Slivka

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 10. 05. 2012 .....

## **Poděkování**

Děkuji doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D. za pomoc a vedení při zpracování disertační práce. Dále bych rád poděkoval členům Katedry elektroniky za cenné rady a odborné vedení v průběhu studia.

Děkuji své rodině a za jejich trpělivost a podporu.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá výzkumem řídicích algoritmů a výměny dat řídicích jednotek v reálném systému vozidla s elektrickým pohonem. Hlavním předmětem výzkumu je vytvoření algoritmu elektronického diferenciálu a dalších funkcí, jako je například uzávěrka diferenciálu. Simulační část se věnuje vytvoření algoritmů vhodných k implementaci do reálného systému silničního vozidla. Vlastní algoritmus je poté implementován do vozidla vybaveného dvěma asynchronními motory a napěťovými střídači s vlastními řídicími jednotkami. Komunikace mezi jednotkami je zprostředkována pomocí rozhraní SPI. Asynchronní motory jsou řízeny metodami vektorového řízení a přímého řízení momentu.

## **Klíčová slova**

Vozidlo, mechanický diferenciál, uzávěrka diferenciálu, vozidlo s elektrickým pohonem, elektronický diferenciál, simulační model, asynchronní motor, algoritmus řízení, vektorové řízení, přímé řízení momentu, Freescale, CodeWarrior, komunikace, rozhraní SPI, sběrnice CAN.

## **Abstract**

This work deals with control algorithms and data transfer between control units in real system of electric vehicle. Main research subject is development of electronic differential algorithm and other functions e.g. locking differential. Simulation part handles with creation of control algorithms methods suitable for implementation in real road vehicle system. Methods are then implemented into the electric vehicle equipped with two asynchronous machines and voltage inverters with control units. SPI is used as communication interface. Vector control and direct torque control are used for controlling of asynchronous machines.

## **Keywords**

Vehicle, Mechanical Differential, Locking Differential, Electric Vehicle, Electronic Differential, Simulation Model, Asynchronous Machine, Control Algorithm, Vector Control, Direct Torque Control, Freescale, CodeWarrior, Communication, SPI Interface, CAN Bus.



## Seznam použitých symbolů

$F_{CO}$	[Nm]	celkový jízdní odpor
$m$	[kg]	celková hmotnost vozidla
$f$	[-]	koeficient válivého tření
$\alpha$	[°]	úhel stoupání
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
$c_w$	[-]	koeficient aerodynamického odporu
$A$	[m <sup>2</sup> ]	největší hodnota průřezu vozidla
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost vozidla
$v_0$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost protivětru
$F$	[N]	hnací síla
$M$	[Nm]	hnací moment motoru
$\eta$	[-]	účinnost
$P$	[W]	výkon motoru
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru
$r$	[m]	poloměr kola
$i$	[-]	převodový poměr
$r_V$	[m]	poloměr dráhy vztažného bodu od středu zatáčky
$r_L$	[m]	poloměr dráhy levého kola
$r_P$	[m]	poloměr dráhy pravého kola
$s_V$	[m]	dráha vztažného bodu
$s_L$	[m]	dráha levého kola
$s_P$	[m]	dráha pravého kola
$\phi_V$	[°]	úhel dráhy vztažného bodu
$\phi_{DL}$	[°]	úhel dráhy levého kola
$\phi_{DP}$	[°]	úhel dráhy pravého kola
$N_L$	[-]	počet otáček levého kola
$N_P$	[-]	počet otáček pravého kola
$o_{PNEU}$	[m]	obvod pneumatiky
$n_L$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky levého kola
$n_P$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky pravého kola
$t_V$	[s]	čas průjezdu zatáčkou
$\mu$	[-]	koeficient přilnavosti
$F_f$	[Nm]	třecí síla působící mezi kolem a vozovkou
$F_Z$	[Nm]	přítlačná síla kola
$\delta_L$	[°]	úhel natočení levého kola
$\delta_P$	[°]	úhel natočení pravého kola
$s$	[-]	skluz

$F_O$	[N]	odstředivá síla
$R_Z$	[m]	poloměr zatáčky
$I_{PaRMS}$	[A]	efektivní hodnota proudu motoru pravého kola
$I_{LaRMS}$	[A]	efektivní hodnota proudu motoru levého kola
$M_H$	[Nm]	točivý moment na hnací hřídeli
$M_L$	[Nm]	točivý moment na levém kole
$M_P$	[Nm]	točivý moment na pravém kole
$P_L$	[W]	výkon na levém kole
$P_P$	[W]	výkon na pravém kole
$\omega_L$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost levého kola
$\omega_P$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost pravého kola
$M_{\Sigma C}$	[Nm]	celková hodnota žádaného momentu
$M_{\Sigma 1}$	[Nm]	žádaná hodnota momentu motoru 1
$M_{\Sigma 2}$	[Nm]	žádaná hodnota momentu motoru 2
$M_{S1}$	[Nm]	skutečná hodnota momentu motoru 1
$M_{S2}$	[Nm]	skutečná hodnota momentu motoru 2
$M_{L1}$	[Nm]	moment zátěže motoru 1
$M_{L2}$	[Nm]	moment zátěže motoru 2
$\omega_{\Sigma 1}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	žádaná hodnota úhlové rychlosti motoru 1
$\omega_{\Sigma 2}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	žádaná hodnota úhlové rychlosti motoru 2
$\omega_{S1}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	skutečná hodnota úhlové rychlosti motoru 1
$\omega_{S2}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	skutečná hodnota úhlové rychlosti motoru 2
$n_{S1}$	[min <sup>-1</sup> ]	skutečná hodnota otáček motoru 1
$n_{S2}$	[min <sup>-1</sup> ]	skutečná hodnota otáček motoru 2
$u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}$	[V]	okamžité hodnoty fázových napětí statoru
$i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$	[A]	okamžité hodnoty fázových proudů statoru
$\Psi_{1a}, \Psi_{1b}, \Psi_{1c}$	[Wb]	okamžité hodnoty magnetického toku v osách a, b, c
$R_1$	[Ω]	odpor jedné fáze vinutí statoru
$R_2$	[Ω]	odpor jedné fáze vinutí rotoru
$\underline{u}_1^S$		prostorový vektor napětí statoru orientovaný do statorového souřadnicového systému
$\underline{u}_2^S$		prostorový vektor napětí rotoru orientovaný do statorového souřadnicového systému
$\underline{i}_1^S$		prostorový vektor proudu statoru orientovaný do statorového souřadnicového systému
$\underline{i}_2^S$		prostorový vektor proudu rotoru orientovaný do statorového souřadnicového systému
$\underline{\Psi}_1^S$		prostorový vektor magnetického toku orientovaný do statorového

		souřadnicového systému
$\underline{\psi}^S$		prostorový vektor magnetického toku orientovaný do rotorového souřadnicového systému
$L_1$	[H]	celková indukčnost jedné fáze statorového vinutí
$L_2$	[H]	celková indukčnost jedné fáze rotorového vinutí
$L_h$	[H]	hlavní indukčnost
$L_{1\sigma}$	[H]	přepočtená rozptylová indukčnost statoru
$L_{2\sigma}$	[H]	přepočtená rozptylová indukčnost rotoru
$\sigma$	[-]	výsledný činitel rozptylu
$\sigma_1$	[-]	činitel rozptylu statoru
$\sigma_2$	[-]	činitel rozptylu rotoru
$J_C$	[kg.m <sup>2</sup> ]	celkový moment setrvačnosti
$\omega_1$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost magnetického pole statoru
$\omega_2$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	skluzová úhlová rychlost
$\omega_m$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost magnetického pole rotoru
$\varepsilon$	[rad]	vzájemný úhel mezi osami statorového a rotorového souřadnicového systému
$\gamma$	[rad]	úhel mezi osami statorového a orientovaného souřadnicového systému
$i_{1\alpha}i_{1\beta}$	[A]	reálná a imaginární složka prostorového vektoru statorového proudu v systému statorových souřadnic
$i_{1d}, i_{1q}$	[A]	reálná a imaginární složka prostorového vektoru statorového proudu v systému rotorových souřadnic
$i_{1x}, i_{1y}$	[A]	reálná a imaginární složka prostorového vektoru statorového proudu v systému orientovaných souřadnic
$I_m$	[A]	modul magnetizačního proudu
$i_{m\alpha}i_{m\beta}$	[A]	reálná a imaginární složka vektoru magnetizačního proudu v systému statorových souřadnic
$i_{md}, i_{mq}$	[A]	reálná a imaginární složka vektoru magnetizačního proudu v systému rotorových souřadnic
$H_q$	[Nm]	hystereze toku
$H_m$	[Nm]	hystereze momentu
$s_T$		výstupní signál regulátoru momentu
$s_Q$		výstupní signál regulátoru toku
$\underline{u}_0 - \underline{u}_7$		napěťové vektory dle příslušné spínací kombinace
$N_{S16}$		znaménkové celé 16bitové číslo
$N_{F16}$		znaménkové zlomkové 16bitové číslo

## Seznam zkratek

AB	akumulátorová baterie
ABS	automatický diferenciál omezující skluz
ADC	analogově digitální převodník
AM	asynchronní motor
ASD	protiblokovací systém kol automobilu
ASR	protiprokluzový systém automobilu
BOV	blok odstranění vzájemných vazeb
BRN	blok rekonstrukce napětí
BSP	blok spínacích pulsů
BVM	blok výpočtu momentu
BVN1	blok vektorového natočení 1
BVN2	blok vektorového natočení 2
BVOV	blok vyhodnocení orientujících veličin
BVPR	blok vyhodnocení polohy rotoru
BVSK	blok výpočtu spínací kombinace
BVST	blok výpočtu statorového toku
BVAS	blok vyhodnocení modulu magnetického toku a sektoru
CAN	průmyslová komunikační sběrnice (Controller Area Network)
CRC	cyklický redundantní součet (Cyclic Redundancy Check)
CRCP	pole s hodnotami CRC
CRCSEKV	sekvence CRC kódů
ČSEG	časový segment CAN sběrnice
DAC	digitálně analogový převodník
DP	datové pole
DSC	digitální signálový kontrolér (Digital Signal Controller)
DSP	digitální signálový procesor (Digital Signal Processor)
DTC	přímé řízení momentu (Direct Torque Control)
ED	elektronický diferenciál
ESP	elektronický stabilizační program
ID	identifikační pole
IS	inkrementální senzor
KDD	kód délky dat
LSD	diferenciál omezující skluz
MAC	instrukce Multiply and Accumulate
MCU	jednotka mikrokontroléru (Microcontroller Unit)

MIPS	milión instrukcí za sekundu (Million Instructions per Second)
MISO	signál rozhraní SPI (Master In Slave Out)
MO	meziobvod střídače
MOSI	signál rozhraní SPI (Master Out Slave In)
PCH	příznak chyby
PIT	programovatelný časovač (Programmable Interval Timer)
PJL	pohonná jednotka levého kola
PJP	pohonná jednotka pravého kola
PM	permanentní magnet
PP	příznak přetížení
PWM	pulzní šířková modulace (Pulse Width Modulation)
QSCI	sériové periferní komunikační rozhraní s vysílací frontou (Queued Serial Communications Interface)
QSPI	sériové komunikační rozhraní s vysílací frontou (Queued Serial Peripheral Interface)
$R_{im}$	regulátor magnetizačního proudu
$R_{imd}$	regulátor reálné složky vektoru magnetizačního proudu
$R_{imq}$	regulátor imaginární složky vektoru magnetizačního proudu
$R_{isx}$	regulátor magnetizační složky vektoru statorového proudu
$R_{isy}$	regulátor momentotvorné složky vektoru statorového proudu
$R_m$	hysterezní regulátor momentu
RP	rozhodovací pole
$R_q$	hysterezní regulátor toku
$R_\omega$	regulátor otáček
ŘJ	řídící jednotka
ŘJED	řídící jednotka elektronického diferenciálu
ŘJDSV	řídící jednotka doplňkových funkcí stabilizace vozidla
ŘP	řídící pole
S	snímače
SCLK	signál rozhraní SPI (Seriál Clock)
SŘ	blok střídače s řídící jednotkou
SS	signál rozhraní SPI (Slave Select)
SYNCH	synchronizace
T2/3	transformace z dvouosého do tříosého souřadnicového systému
T3/2	transformace z tříosého do dvouosého souřadnicového systému
TQ	základní časová jednotka CAN sběrnice
VA	vektorový analyzátor
VEP	vozidlo s elektrickým pohonem

## Cíle disertační práce

Cílem doktorské disertační práce je výzkum chování vozidla s nezávislým pohonem nápravy realizovaným dvěma asynchronními motory řízenými algoritmy vektorového řízení, popř. přímého řízení momentu a následná realizace elektronického diferenciálu.

Pro dosažení cíle byly stanoveny následující dílčí úkoly:

- *Teoretický rozbor jízdních vlastností vozidla.*
- *Analýza mechanického diferenciálu.*
- *Návrh a realizace modelu elektronického diferenciálu.*
- *Ověření funkce elektronického diferenciálu v simulacích při použití MATLAB/Simulink.*
- *Výběr vhodných metod řízení asynchronního stroje pro použití ve vozidle s elektrickým pohonem.*
- *Vývoj řídicích algoritmů pro implementaci do řídicího systému s digitálním signálovým kontrolérem.*
- *Ověření použitých řídicích algoritmů asynchronních motorů na laboratorním stanovišti.*
- *Ověření funkce komunikačního rozhraní využitelného pro funkci elektronického diferenciálu.*
- *Ověření vlastností implementované funkce elektronického diferenciálu na reálném systému vozidla s elektrickým pohonem.*

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Zkoumaná problematika .....</b>	<b>15</b>
1.1 Základní pojmy, vzorce .....	15
1.2 Průjezd vozidla zatáčkou .....	15
1.3 Mechanický diferenciál.....	18
1.4 Systémy zajišťující bezpečnost vozidla .....	20
1.5 Koncepce vozidla s elektrickým pohonem .....	21
<b>2 Analýza chování reálného systému.....</b>	<b>22</b>
2.1 Chování vozidla při průjezdu zatáčkou.....	22
2.1.1 Závislost drah kol vozidla vzhledem k celkové dráze vozidla.....	22
2.2 Chování vozidla bez elektronického diferenciálu s řízením typu $U/f = \text{konst.}$ .....	23
<b>3 Elektronický diferenciál.....</b>	<b>25</b>
3.1 Funkce elektronického diferenciálu.....	25
3.1.1 Základní funkce .....	25
3.1.2 Doplnkové funkce.....	25
3.2 Modely ED a simulační výsledky.....	27
3.2.1 Model ED .....	27
3.2.2 Model uzávěrky ED – Metoda 1 .....	30
3.2.3 Model uzávěrky ED – Metoda 2.....	33
<b>4 Metody řízení asynchronního stroje.....</b>	<b>36</b>
4.1 Matematický model asynchronního motoru.....	36
4.2 Vektorové řízení .....	37
4.3 Přímé řízení momentu.....	40
<b>5 Reálné vozidlo s elektrickým pohonem .....</b>	<b>44</b>
5.1 Detailní popis vozidla s elektrickým pohonem .....	44
5.1.1 Dvojitý střídač s napěťovým meziobvodem .....	44
5.1.2 Řídicí jednotka s DSC 56F8037.....	46
5.1.3 Akumulátory.....	46
5.1.4 Použité asynchronní motory .....	46
5.2 Implementace řídicích algoritmů.....	47
5.2.1 CodeWarrior a QuickStart.....	47
5.2.2 Ladící prostředí FREEMASTER .....	48

5.2.3	Knihovny zapouzdřených funkcí .....	49
5.3	Implementace funkce elektronického diferenciálu.....	49
5.3.1	Výměna informací mezi řídícími jednotkami a se sběrnici vozidla.....	50
5.3.2	Komunikační rozhraní CAN.....	50
5.3.3	Rozhraní SPI.....	52
<b>6</b>	<b>Experimentální výsledky .....</b>	<b>54</b>
6.1	Ověření řídících algoritmů na laboratorním modelu .....	54
6.1.1	Vektorového řízení proudová smyčka.....	55
6.1.2	Vektorového řízení otáčková smyčka .....	56
6.1.3	DTC – Takahashiho metoda použití aktivních i nulových vektorů.....	56
6.1.4	DTC – Takahashiho metoda použití pouze aktivních vektorů.....	57
6.1.5	Výměna dat mezi jednotkami s použitím CAN .....	58
6.1.6	Výměna dat mezi jednotkami s použitím SPI.....	60
6.2	Ověření algoritmů elektronického diferenciálu ve vozidle s elektrickým pohonem .....	62
6.2.1	ED na válcovém dynamometru – Vektorové řízení .....	64
6.2.1.1	Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním.....	64
6.2.1.2	Rozjezd s ED a následné odbuzení motorů.....	66
6.2.2	ED na válcovém dynamometru – DTC .....	67
6.2.2.1	Rozjezd s ED.....	67
6.2.3	ED na vozovce – Vektorové řízení .....	67
6.2.3.1	Rozjezd s ED a následné couvání.....	68
6.2.3.2	Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním.....	69
6.2.3.3	Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky .....	70
6.2.3.4	Rozjezd s ED do pravotočivé zatáčky .....	71
6.2.3.5	Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky s rekuperačním brzděním.....	72
6.2.4	ED na vozovce – DTC.....	73
6.2.4.1	Rozjezd s ED.....	73
6.2.4.2	Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním.....	74
6.2.4.3	Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky a následné couvání .....	75
6.2.4.4	Rozjezd s ED do pravotočivé zatáčky .....	76
6.2.5	Shrnutí výsledků ED při vektorovém řízení a přímém řízení momentu.....	77
6.2.6	Metody uzávěrek ED testované na válcovém dynamometru.....	78
6.2.6.1	Uzávěrka ED – Metoda 1.....	78
6.2.6.2	Uzávěrka ED – Metoda 2.....	82



6.2.7	Metody uzávěrek ED testované na vozovce – Metoda 1.....	86
6.2.7.1	Metoda 1 rozjezd.....	86
6.2.7.2	Metoda 1 rozjezd do levotočivé zatáčky.....	87
6.2.7.3	Metoda 1 rozjezd do pravotočivé zatáčky .....	88
6.2.8	Metody uzávěrek ED testované na vozovce – Metoda 2.....	89
6.2.8.1	Metoda 2 rozjezd.....	89
6.2.8.2	Metoda 2 rozjezd do levotočivé zatáčky.....	90
6.2.8.3	Metoda 2 rozjezd do pravotočivé zatáčky .....	91
6.2.9	Shrnutí výsledků metod uzávěrek elektronického diferenciálu .....	92
6.2.10	Protiprokluzová funkce .....	93
6.2.11	Funkce rekuperačního brzdění.....	93
<b>Závěr .....</b>		<b>95</b>
<b>Použitá literatura .....</b>		<b>97</b>
<b>Publikační činnost.....</b>		<b>99</b>

---

## Úvod

Mechanický diferenciál dnes najdeme téměř v každém typu automobilu se spalovacím motorem. Základním principem mechanického diferenciálu je rozdělení momentu přiváděného hnací hřídelí na jednotlivá kola tak, aby na všech kolech byl moment stejný. Ovšem u vozidel, kde je pohon kol řešen elektromotory a není zde obsažen mechanický diferenciál, je nutné vytvoření algoritmů zajišťujících vzájemnou spolupráci elektromotorů.

Úvahy vycházejí z analogie s mechanickým diferenciálem. Výzkum tohoto problému nekončí pouze u samotné funkce diferenciálu.

Analýza chování reálných mechanických systémů slouží k vytvoření simulačních modelů. Podle výsledků budou vybrány algoritmy vhodné k implementaci do řídicího systému vozidla. Funkce elektronického diferenciálu jsou rozděleny na základní a doplňkové. Základní funkcí je rozdělení žádaného momentu na jednotlivá kola. Mezi doplňkové funkce je zařazena uzávěrka diferenciálu, protiprokluzová funkce a protiblokovácí funkce při rekuperačním brzdění. Dále je možno nadřadit stabilizační funkci vozidla, která kombinuje předešlé funkce k zajištění korektního chování vozidla za všech podmínek.

Předmětem výzkumu je vozidlo s elektrickým pohonem přední nápravy s možností nezávislého řízení momentu/otáček motorů umístěných na levém a pravém kole. Vozidlo je vybaveno dvěma asynchronními motory s integrovanými čidly otáček a dvěma napěťovými střídači s vlastními řídicími jednotkami. Napájení je řešeno pomocí akumulátorové baterie. Řízení momentů (popřípadě otáček motorů) je realizováno algoritmem vektorového řízení a přímého řízení momentu.

Důležitou částí je komunikace řídicích jednotek, neboť pro vytvoření algoritmu elektronického diferenciálu je nutná výměna okamžitých skutečných hodnot otáček a momentů motorů. Jako hlavní komunikační rozhraní bylo vybráno rozhraní SPI, sběrnice CAN bude sloužit pro připojení pohonné jednotky vozidla na společnou komunikační sběrnici. Byly vytvořeny algoritmy pro komunikaci přes rozhraní SPI mezi jednotkami i pro komunikace přes sběrnici CAN.

Navržené algoritmy řízení asynchronního motoru byly nejdříve odladěny na laboratorním stanovišti, a to i v součinnosti s komunikačními algoritmy. Poté bylo provedeno otestování algoritmů přímo ve vozidle s elektrickým pohonem.

První fáze měření probíhala v laboratoři na válcovém dynamometru. V druhé fázi již probíhalo měření a testování na vozovce při napájení z akumulátorové baterie.

# 1 Zkoumaná problematika

Kapitola se zabývá uvedením do řešeného problému a také jeho popisem se zaměřením na mechanický diferenciál, který bude později sloužit jako základ pro vytvoření algoritmů diferenciálu ve vozidle s elektrickým pohonem (VEP).

Pevné spojení pravého a levého kola vozidla zajišťuje dobrou ovladatelnost na rovných úsecích vozovky a také při nestejných adhezních podmínkách na jednotlivých kolech. Problém nastává při průjezdu vozidla zatáčkou, kde vlivem jednotné hřídele dochází k prokluzu kol, a tím i ke snížené ovladatelnosti vozidla. Na druhou stranu nezávislý pohyb obou kol vede k lepší ovladatelnosti vozidla v zatáčkách, avšak nastává problém při prokluzu kol.

Navíc zde nastávají problémy způsobené kombinací předešlých. Samotný mechanický diferenciál řeší problém jen z části. Je nutné přiřadit také uzávěrku, která opět přináší zlepšení vlastností celé soustavy.

## 1.1 Základní pojmy, vzorce

Na vozidlo při jeho pohybu působí jízdní odpory. Tyto odpory jsou síly, které působí proti jeho pohybu [1] [2]. Celkový jízdní odpor vyjádříme:

$$F_{CO} = F_1 + F_2 + F_3 \quad [N; N] \quad (1.1)$$

Kde válivý odpor  $F_1$ , aerodynamický odpor vzduchu  $F_2$  a odpor stoupání  $F_3$  vyjádříme:

$$F_1 = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad [N; -, m \cdot s^{-2}, kg, ^\circ] \quad (1.1)$$

$$F_2 = 0,5 \cdot \rho \cdot c_w \cdot A (v + v_0)^2 \quad [N; kg \cdot m^{-3}, -, m^2, m \cdot s^{-1}] \quad (1.2)$$

$$F_3 = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N; kg, m \cdot s^{-2}, ^\circ] \quad (1.3)$$

Hnací sílu vozidla můžeme vyjádřit následovně:

$$F = \frac{M \cdot i}{r} \cdot \eta \quad [N; Nm, -, -, m] \quad (1.4)$$

Popř.:

$$F = \frac{P \cdot \eta}{v} \quad [N; W, -, m \cdot s^{-1}] \quad (1.5)$$

Pro přepočet otáček motoru vozidla na celkovou jeho rychlost použijeme následující rovnici:

$$n = 60 \cdot \frac{v \cdot i}{2 \pi \cdot r} \quad [min^{-1}; m \cdot s^{-1}, -, m] \quad (1.6)$$

## 1.2 Průjezd vozidla zatáčkou

Problematiku průjezdu vozidla zatáčkou nelze popsat jednoznačně, neboť do soustavy vstupuje více vnějších vlivů, jako je např. adheze jednotlivých kol nebo chvění při natočení kol vlivem ovládání vozidla. Proto v následujícím modelu nebudou zvažovány některé vnější vlivy.

Průjezd vozidla zatáčkou popsán v této kapitole bude sloužit jako základ pro simulace a následné odvození funkce elektronického diferenciálu. Matematický model vychází z Ackermannova modelu.

Základní informace o VEP jsou popsány v kapitole 1.5, avšak pro vytvoření matematického modelu je nutné znát, že přední náprava je hnací nápravou s odděleným pohonem kol. Vztažný bod pro simulace je zvolen průsečík osy vozidla a osy přední nápravy značený jako *A* (Obr. 1.1). Tento bod při průjezdu vozidla zatáčkou je vzdálen od středu zatáčky *S* o poloměr  $R_Z$ . Vzdálenosti pravého a levého kola od středu zatáčky jsou značeny  $r_P$  a  $r_L$ .

Vozidlo při průjezdu zatáčkou urazí dráhu, která je vypočtena vzhledem k úhlu  $\phi_V$ . Dráhu  $s_V$  vypočteme jako kruhovou výseč s poloměrem  $R_Z$ :

$$s_V = 2\pi \cdot R_Z \cdot \frac{\phi_V}{360} \quad [m; m, ^\circ] \quad (1.7)$$

Délky ujetých drah budou pro jednotlivá kola vzorce následující:

$$s_L = 2\pi \cdot r_L \cdot \frac{\phi_{DL}}{360} \quad [m; m, ^\circ] \quad (1.8)$$

$$s_P = 2\pi \cdot r_P \cdot \frac{\phi_{DP}}{360} \quad [m; m, ^\circ] \quad (1.9)$$

Vyjdeme-li ze známého rozměru pneumatiky (např.: 195/50 R15), můžeme vypočítat počet otáček jednotlivých kol při průjezdu zatáčkou:

$$N_L = \frac{s_L}{o_{PNEU}} \quad [-; m, m] \quad (1.10)$$

$$N_P = \frac{s_P}{o_{PNEU}} \quad [-; m, m] \quad (1.11)$$

Kde  $o_{PNEU}$  je vypočtený obvod pneumatiky.

Výpočet otáček jednotlivých kol, známe-li čas průjezdu zatáčkou  $t_V$ :

$$n_L = \frac{N_L}{60 \cdot t_V} \quad [min^{-1}; -, s] \quad (1.12)$$

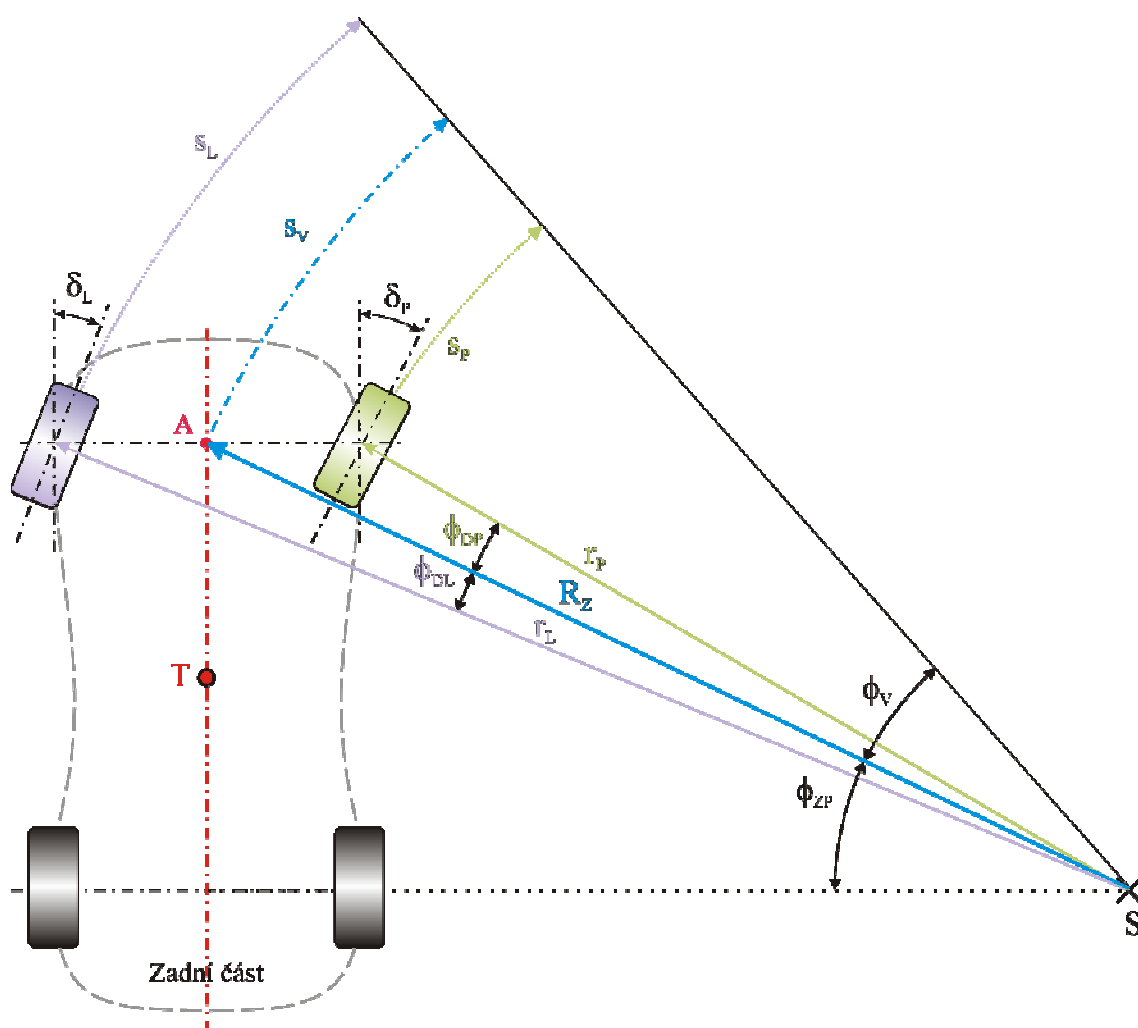
$$n_P = \frac{N_P}{60 \cdot t_V} \quad [min^{-1}; -, s] \quad (1.13)$$

Součinitel přilnavosti (adheze) pneumatik  $\mu$  k vozovce vyjadřuje schopnost přenosu sil, které lze přenést mezi koly a vozovkou. Je závislý na následujících faktorech [1] [2] [3]:

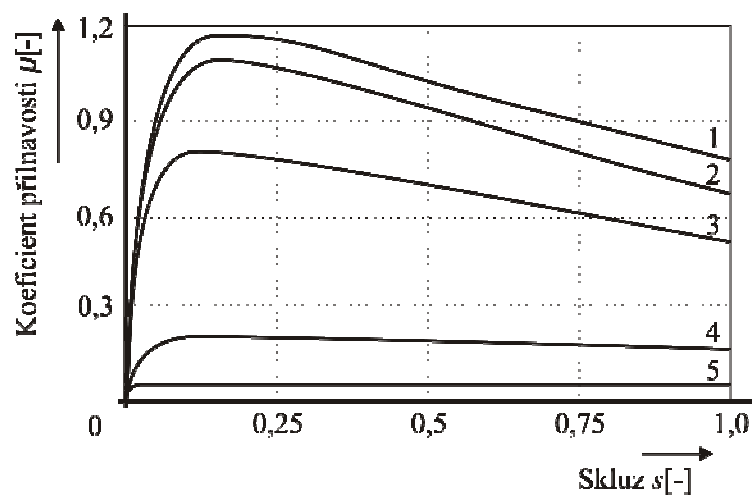
- Stav vozovky (suchá, mokrá, zledovatělá)
- Povrch vozovky
- Stav pneumatiky

$$\mu = \frac{F_f}{F_Z} \quad [-; N] \quad (1.14)$$

Volně se odvalující kolo má nulový skluz, zablokované kolo 100 %.



Obr. 1.1 Matematický model průjezdu vozidla pravotočivou zatáčkou

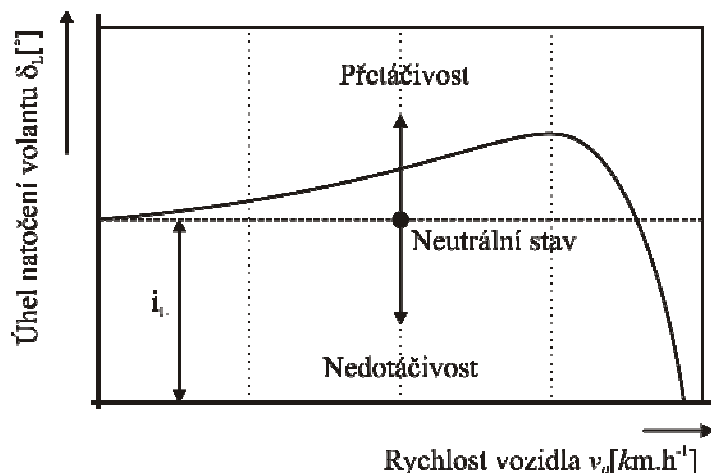


Obr. 1.2 Typický průběh součinitele přilnavosti (1 – suchá cesta, 2 – suchý beton, 3 – mokrá cesta, 4 – sníh, 5 – led)[1]

Při jízdě zatáčkou působí na automobil odstředivá síla  $F_O$  [1]:

$$F_O = \frac{m \cdot v^2}{R_Z} \quad [N; kg, m \cdot s^{-1}, m] \quad (1.15)$$

Nedotáčivost a přetáčivost vozidla závisí na rychlosti vozidla a také na úhlu natočení volantu, respektive na velikosti směrových odchylek jednotlivých kol [4].

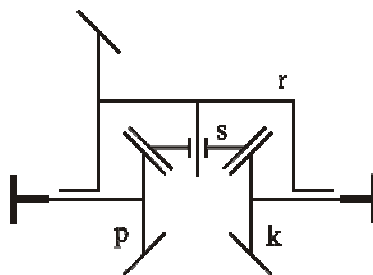


Obr. 1.3. Kruhová jízda [1]

### 1.3 Mechanický diferenciál

Od dob vynálezu diferenciálního soukolí z roku 1827, který ve své době sloužil pro rozdělení momentu přicházející na hřídel parního stroje, se základní princip diferenciálu změnil jen málo. Avšak po mechanické stránce byl obohacen o řadu dalších důležitých funkcí, bez nichž bychom si dnešní automobily představili jen velmi těžko.

Z mechanického hlediska je diferenciální soukolí jednoduchým planetovým soukolím, jež je označováno jako  $2k+r$ , tedy soukolí se dvěma centrálními koly a jedním unáščem [5] [6].

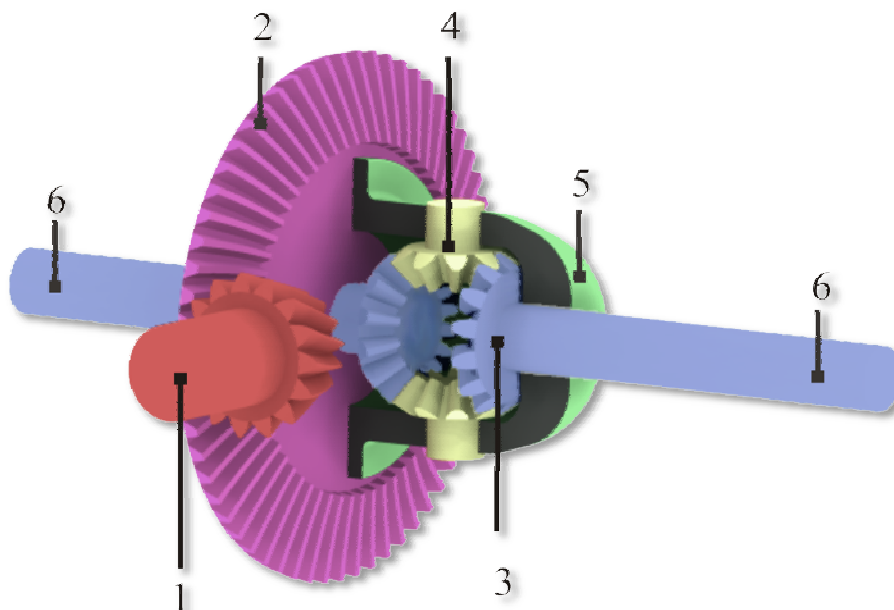


Obr. 1.4 Soukolí typu  $2k+r$  [5]

Mechanický diferenciál umožňuje lepší ovladatelnost vozidla v zatáčce, kde vnější kola urazí delší dráhu vlivem toho, že opisují větší poloměr než kola vnitřní.

Jsou-li kola umístěna na stejné hřídeli, musí zákonitě jedno nebo obě kola prokluzovat, což např. vede ke snížené ovladatelnosti vozidla. Právě rozdíl v těchto otáčkách kol jedné nápravy řeší diferenciální soukolí (diferenciál). Skříň diferenciálu neboli unášec se spolu s talířovým kolem otáčí stále stejnými otáčkami, zatímco kola vozidla různými otáčkami, a to díky dvěma stupňům volnosti. Diferenciál zajišťuje samočinné vyrovnávání rozdílných otáček hnacích kol

při jízdě v zatáčce a zároveň rozděljuje hnací točivý moment na obě kola vozidla, které jsou pomocí hnacích hřídelí spojeny s planety [7].



Obr. 1.5 Kuželové soukolí a diferenciál s kuželovými koly

- |                      |  |
|----------------------|--|
| 1 - Pastorek         | 5 - Unášec satelitů                    |
| 2 - Talířové kolo    | 6 - Hnací hřídel levého a pravého kola |
| 3 - Kuželový planet  |  |
| 4 - Kuželový satelit |  |

Z hlediska přenosu hnacích momentů existují následující varianty diferenciálu:

- bez uzávěrky diferenciálu
- s mechanickou uzávěrkou diferenciálu
- diferenciál se zvýšeným vnitřním třením
- samosvorný diferenciál

Točivý moment hnací hřídele lze pomocí točivých momentů kol vyjádřit následovně:

$$M_H = M_L + M_P \quad [Nm; Nm, Nm] \quad (1.16)$$

A tedy:

$$M_L = M_P = \frac{M_H}{2} \quad [Nm; Nm] \quad (1.17)$$

Při průjezdu vozidla zatáčkou musí tedy platit rovnice 1.17, avšak vnější kolo se otáčí rychleji než vnitřní a proto  $n_L \neq n_P$ , výkony na levé a pravé straně musejí být také rozdílné:

$$P_L = M_L \omega_L; P_P = M_P \omega_P \quad [W; Nm, rad.s^{-1}] \quad (1.18)$$

$$P_L \neq P_P \quad (1.19)$$

Bereme-li v úvahu rovnici 1.17 při nestejných adhezních podmínkách na levém a pravém kole (např. kluzké nebo sypké místo), tak zjistíme, že v takovém případě je rovnost momentu nevhodná. Prokluzující kolo může mít až dvojnásobné otáčky než klec diferenciálu, a je nutné vyřadit diferenciál z provozu. Tuto funkci zastává závěr diferenciálu. U klasického kuželového diferenciálu uzávěrka daným způsobem spojí pevně klec diferenciálu s jedním planetovým kolem. Diferenciál je vyřazen z činnosti, protože se nemohou otáčet ani satelity. Nevýhodu nutnosti zapínání a vypínání závěru diferenciálu přináší samosvorné typy diferenciálů, jako např. [7]:

- *mechanické diferenciály se zvýšeným třením (Lok-O-Matic, Borg-Warner, LSD, ZF-DL)*
- *automatické diferenciály (ASD)*

Princip mechanického diferenciálu přenositelný na elektronickou verzi by mohl být odvozen ze samosvorného diferenciálu ZF s viskózní spojkou. Tento typ pracuje tak, že přenos točivého momentu vzrůstá s rozdílem otáček levé a pravé hnací hřídele. Při normálním režimu pracuje diferenciál bez uzávěrky, avšak dojde-li k prokluzu, dosahuje tento typ až 100% závěrného účinku [3].

## 1.4 Systémy zajišťující bezpečnost vozidla

Ovladatelnost vozidla na vozovce je ovlivněna velikostí sil, které lze vzájemně přenést mezi koly a vozovkou. Zde vstupuje součinitel adheze neboli přilnavosti, který je ukazatelem okamžité schopnosti přenosu sil. Můžeme jej vyjádřit jako poměr svislého zatížení kola a podélné nebo boční síly.

Pro zvýšení bezpečnosti a komfortu ovladatelnosti vozidla byla vyvinuta řada asistenčních systémů. Tyto systémy jsou založeny na vyhodnocování kritických situací pomocí elektronického systému. Mezi tyto systémy patří [1] [2]:

- a) Anti-lock Brake System (ABS) – protiblokovací systém
- b) Anti-skid Regulation (ASR) – protiskluzový systém
- c) Electronic Stability Program (ESP) – neboli elektronická stabilizace jízdy

Ad a) Systém nasazovaný v automobilech již od roku 1978, který vhodným způsobem zajišťuje odblokování kol při skluzu u prudkého brzdění, a tím zabezpečuje ovladatelnost vozidla a snižuje riziko smyku. Prakticky jde o to, že čím větší je hodnota brzdného skluzu, tím je schopnost kola přenášet boční síly nižší. Úlohou protiblokovací regulace je zaručit optimální využití přilnavosti mezi kolem a vozovkou a je tedy nutno vhodným způsobem omezit velikost brzdného momentu. ABS je principiálně složen ze tří základních částí:

- 1 - senzor snímající okamžitou rychlost otáčení
- 2 - řídicí jednotka ve funkci vyhodnocovacího členu
- 3 - akční člen měnící tlak v brzdovém válci

Ad b) Obdobným problémem je akcelerace vozidla, kdy vlivem adhezních podmínek může dojít k prokluzu kol, a tím ke smyku. Jestliže začne kolo prokluzovat, není schopno přenášet žádnou boční sílu. Princip je založen na vyhodnocování okamžitých adhezních podmínek (snímání otáček všech kol), pomocí kterých se omezuje hnací moment kola. U vozidel je možno ASR realizovat několika způsoby:

- *motorová regulace – snížení hnacího momentu*

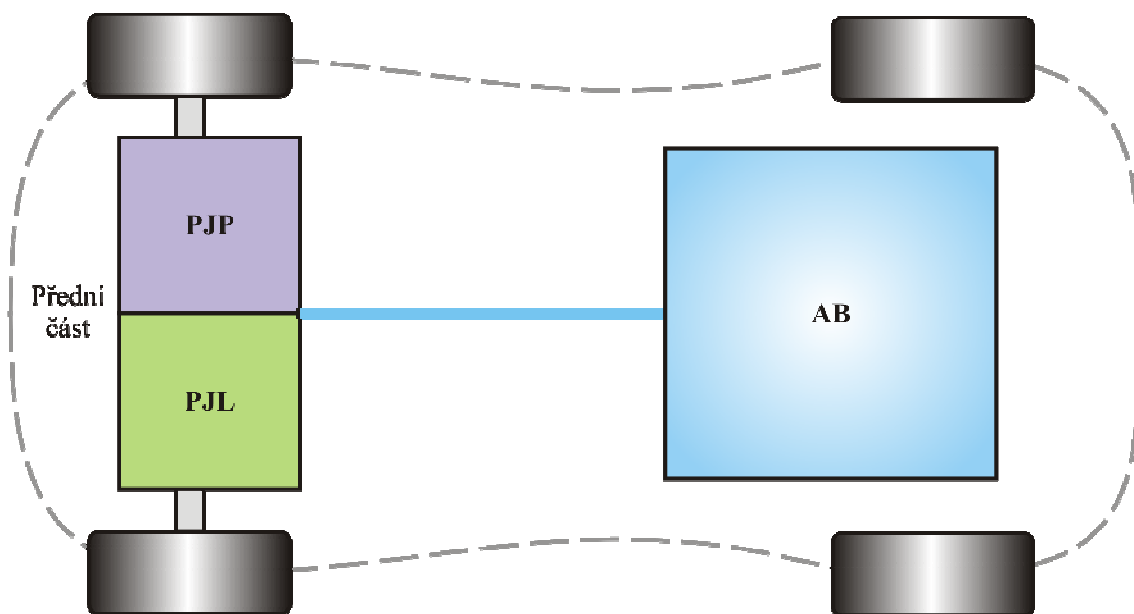


- *brzdová regulace – přibrzdňování hnacích kol*
- *regulace uzavírání diferenciálu*

Ad c) Systém ESP je již pokročilejším systémem, ale také nejmladším, který kombinuje regulaci skluzu nebo prokluzu pneumatiky v podélném směru (ve směru jízdy) a v příčném směru. Tento příčný skluz vede ke snižování stability vozidla hlavně při průjezdu zatáčkou a potažmo také ke smyku. Při nedotáčivém a přetáčivém chování vozidla zasahuje ESP tak, aby vozidlo udrželo jízdní stopu [2].

### 1.5 *Koncepce vozidla s elektrickým pohonem*

Vozidlo, na kterém se provádí výzkum elektronického diferenciálu je postaveno na karoserii Kaipan 14 vyráběnou firmou Kaipan spol. s r. o. Jak lze pozorovat na následujícím obrázku, poháněná je přední náprava vozidla pomocí dvou pohonných jednotek. Jde tedy o vozidlo s **odděleným pohonem** kol přední nápravy. Všechny elektronické prvky jsou tedy umístěny v přední části s označením pohonná jednotka levého kola (PJP), pohonná jednotka pravého kola (PJP) a akumulátorová baterie (AB) je rovnoměrně rozložena po celém vozidle.



Obr. 1.6 Koncepce vozidla

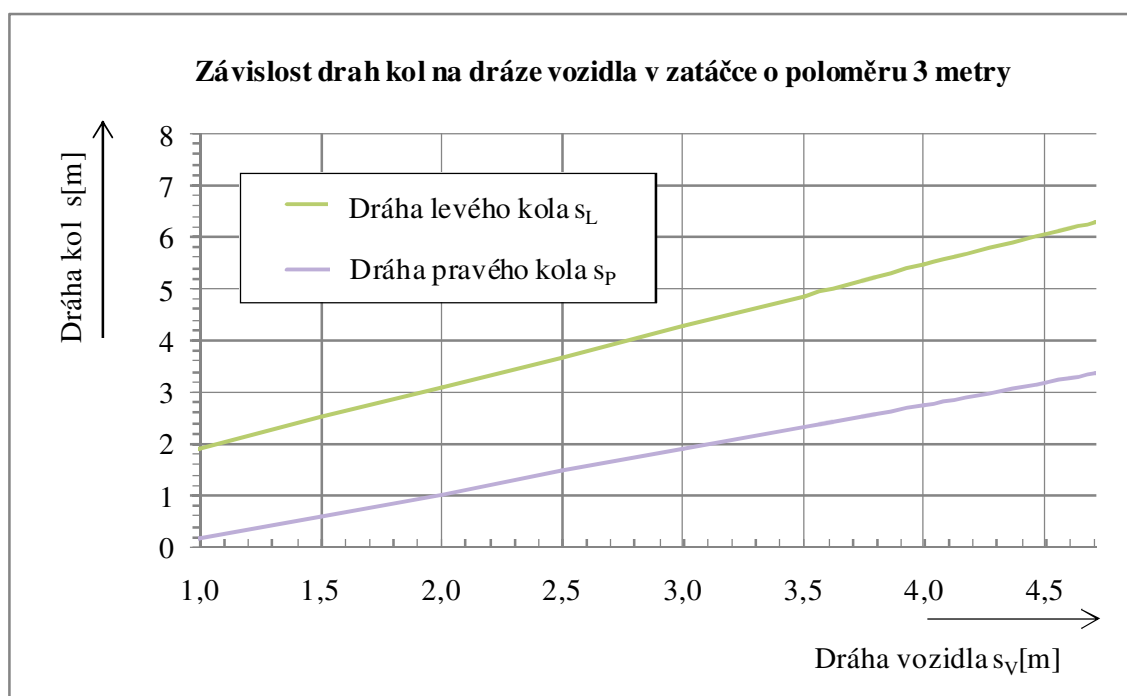
## 2 Analýza chování reálného systému

### 2.1 Chování vozidla při průjezdu zatáčkou

Matematický model v kapitole 1.2 byl použit pro výpočet drah, popř. otáček levého a pravého kola vzhledem k celkové dráze vozidla při průjezdu vozidla pravotočivou zatáčkou. Podmínky této situace byly následující:

- a) poloměr zatáčky nastaven na 3 metry
- b) úhel  $\phi_v$  byl nastaven na  $90^\circ$
- c) rozměry pneumatik 195/50 R15
- d) vzdálenost kola přední nápravy od osy vozidla byla 0,86 m

#### 2.1.1 Závislost drah kol vozidla vzhledem k celkové dráze vozidla



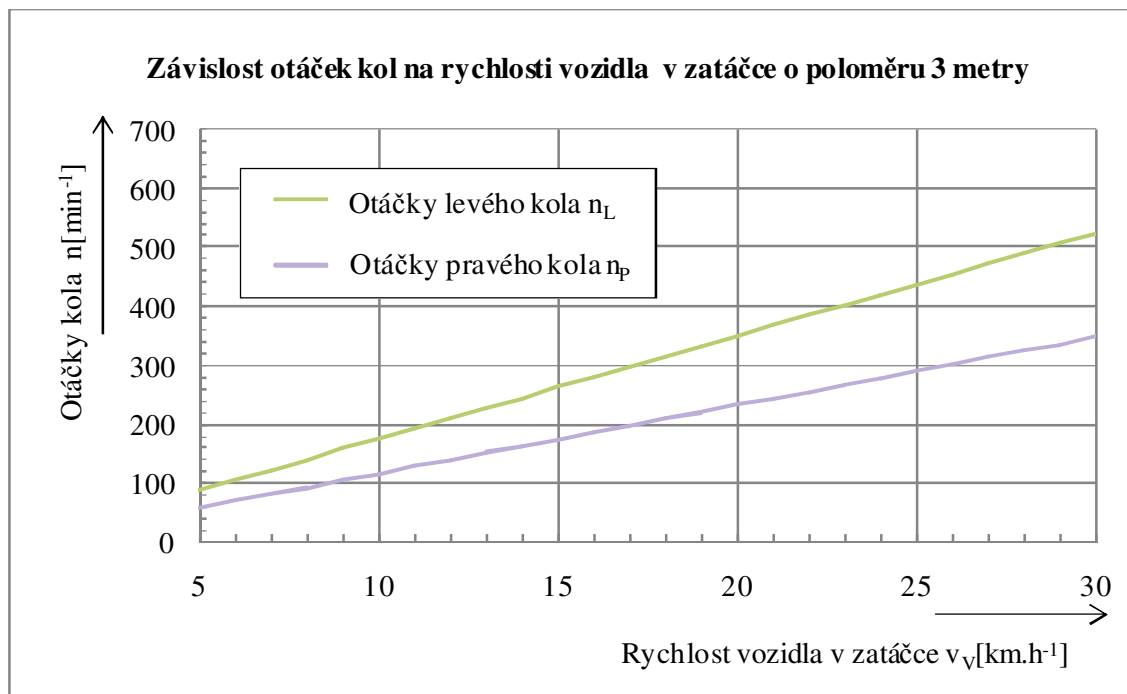
Obr. 2.1 Závislosti drah jednotlivých kol na dráze vozidla při poloměru zatáčky 3 m

Z grafické závislosti na Obr. 2.1 lze pozorovat, že již v polovině zatáčky se dráhy levého a pravého kola liší o 2,18 m. Na konci zatáčky tento rozdíl činí již 2,93 metru.

Výsledky simulace pro zatáčku o poloměru 5 metrů vyústí v tyto výsledky: v polovině zatáčky je rozdíl v drahách 1,55 m a na konci 2,25 m.

Vezmeme-li v úvahu obvod pneumatiky 1,81 m (pro 195/50 R15), je rozdíl v otáčkách na konci zatáčky 1,62 otáček. Což u zatáčky o poloměru 3 metry je podstatný rozdíl vztahený k celkovému počtu otáček kol. U poloměru 5 m je tento rozdíl 1,24 otáček. Rozdíl otáček levého a pravého kola bude tím větší, čím menší bude poloměr zatáčky.

Obr. 2.2 zobrazuje otáčky kol v závislosti na rychlosti vozidla v zatáčce o poloměru 3 m. Při rychlosti vozidla  $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  je rozdíl otáček levého a pravého kola  $58,77 \text{ min}^{-1}$ . S rostoucí rychlostí vozidla při stejném poloměru zatáčky rozdíl otáček kol vzrůstá lineárně.



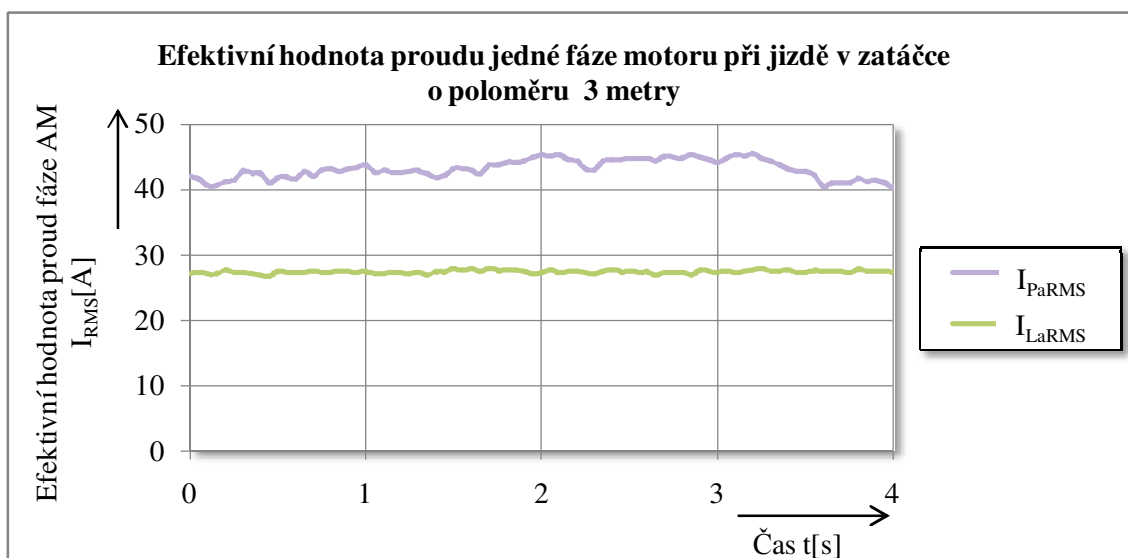
Obr. 2.2 Závislost otáček kol na rychlosti vozidla v zatáčce o poloměru 3 m

## 2.2 Chování vozidla bez elektronického diferenciálu s řízením typu $U/f = \text{konst.}$

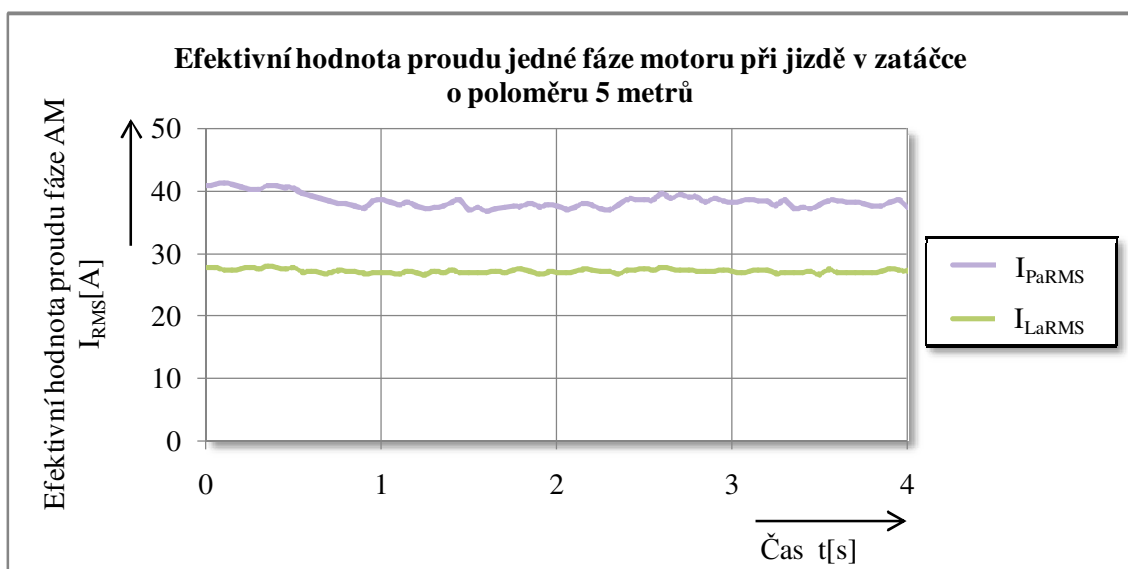
Bylo provedeno měření na starším typu vozidla, aby byly vyšetřeny poměry ve VEP bez elektronického diferenciálu. Toto vozidlo bylo vybaveno jedním střídačem a řízení bylo realizováno pomocí metody  $U/f = \text{konst.}$  Oba dva použité asynchronní motory (viz 5.1.4 Použité asynchronní motory) byly připojeny na výstup tohoto střídače, což znamená, že motory byly napájeny napětím se stejnou frekvencí.

Měření probíhalo během průjezdu dvěma druhy pravotočivých zatáček. První zatáčka měla poloměr 3 metry a druhá 5 metrů. Byla měřena vždy jedna fáze každého motoru. Z těchto dat byly vypočteny efektivní hodnoty proudu ve fázi. V průbězích jsou použity indexy L a P označující levé a pravé kolo.

Jak je z prvního průběhu patrné (Obr. 2.3) při jízdě pravotočivou zatáčkou je na vnitřním (tedy pravém) kole větší efektivní hodnota proudu, neboť toto kolo musí mít zákonitě větší skluz. Stejný výsledek byl pozorován u zatáčky o poloměru 5 metrů s tím rozdílem, že zde byly průměrné efektivní hodnoty proudů na levém a pravém kole menší než v prvním případě.



Obr. 2.3 Efektivní hodnoty jedné fáze při průjezdu zatáčkou o poloměru 3 m (průměrné efektivní hodnoty jsou  $I_{PaRMS} = 42,8$  A,  $I_{LaRMS} = 27,6$  A)



Obr. 2.4 Efektivní hodnoty jedné fáze při průjezdu zatáčkou o poloměru 5 m (průměrné efektivní hodnoty jsou  $I_{PaRMS} = 38,8$  A,  $I_{LaRMS} = 27,3$  A)

Z tohoto měření vyplývá:

- Řízení typu  $U/f = \text{konst.}$  je nevhodné pro použití ve vozidle s elektrickým pohonem, kde jsou oba motory napájeny z jednoho střídače, neboť se zvětšením skluzu se zvětšuje moment (ve stabilní části momentové charakteristiky) a dochází ke zhoršení jízdních vlastností;
- použití duálního typu střídače s mikropočítačovými řídicími systémy obsahující vhodné nezávislé řízení obou motorů bude velkým přínosem z hlediska jízdních vlastností i spotřeby elektrické energie;
- použití elektronického diferenciálu a dalších doplňkových funkcí bude nezbytné.

### 3 Elektronický diferenciál

#### 3.1 *Funkce elektronického diferenciálu*

Předcházející kapitoly sloužily jako základ pro odvození základních a dalších funkcí elektronického diferenciálu (ED). V Následujícím textu budou popsány jednotlivé funkce, které by měl ED zvládat. Funkce jsou rozděleny do dvou kategorií:

- a) základní funkce – obsahují primární funkci elektronického diferenciálu, tedy rozdělení momentu na pravé a levé kolo
- b) doplňkové funkce – slouží jako nadstavba nad základní funkcí a řeší např. závěrku diferenciálu a elektronickou stabilizaci vozidla

##### 3.1.1 Základní funkce

Z kapitoly 1.3. vyplývá, že mechanický diferenciál rozděluje moment přiváděný hlavní hnací hřídelí na polovinu na každé kolo. Jinak tomu nebude ani u implementované funkce ED. Pokud pojede vozidlo po rovném úseku cesty, pak budou na obě kola přiváděny stejně velké momenty. Toto bude platit i při průjezdu zatáčkou. Musí být tedy dodrženo:

$$M_L = M_P \quad [Nm; Nm] \quad (3.1)$$

Nastane-li však nenadálá událost, kdy např. jedno kolo začne prokluzovat vlivem odlišných adhezních podmínek, musí již zasáhnout doplňkové funkce ED (v tomto případě funkce protiskluzová funkce).

##### 3.1.2 Doplňkové funkce

Mezi doplňkové funkce ED jsou zahrnuty následující funkce:

1. závěrka elektronického diferenciálu
2. protiprokluzová funkce
3. elektrické brzdění
4. stabilizace vozidla

Ad 1) Závěrka elektronického diferenciálu bude využívána hlavně při jízdě v terénu, na zledovatělé vozovce a dalších površích, kde může vlivem nestejné adheze dojít ke snížení ovladatelnosti vozidla. Je nutné vycházet z rovnosti rychlostí, resp. otáček na jednotlivých kolech, které v podstatě simulují pevně spojená kola nápravy. Vycházíme ze vztahu 3.2:

$$\omega_L = \omega_P \quad [rad \cdot s^{-1}] \quad \text{resp.} \quad n_L = n_P \quad [min^{-1}] \quad (3.2)$$

Ad 2) U protiskluzové funkce je však situace jiná. Tato funkce musí zareagovat, nejčastěji u rozjezdu nebo akcelerace vozidla, kde nesmí dojít k prokluzu kola nebo kol. Díky tomuto systému se snižuje opotřebení pneumatik a důležitou úlohu zastává u vozidel s pohonem přední nápravy při jízdě do kopce. U této funkce je nutno zjišťovat rychlosti, resp. zrychlení obou kol, a vyhodnotit situace, kdy je nutno zasáhnout do algoritmu řízení;

Ad 3) Ve vozidle bude možno využít funkce elektrického brzdění. Tato funkce bude realizována nastavením žádaného záporného momentu, z tohoto plynou možné situace použití:

- a) při mechanickém brzdění v souvislosti se snížením opotřebení brzdové soustavy vozidla

- b) pro brzdové účinky v situacích kdy není potřeba mít aktivované mechanické brzdy

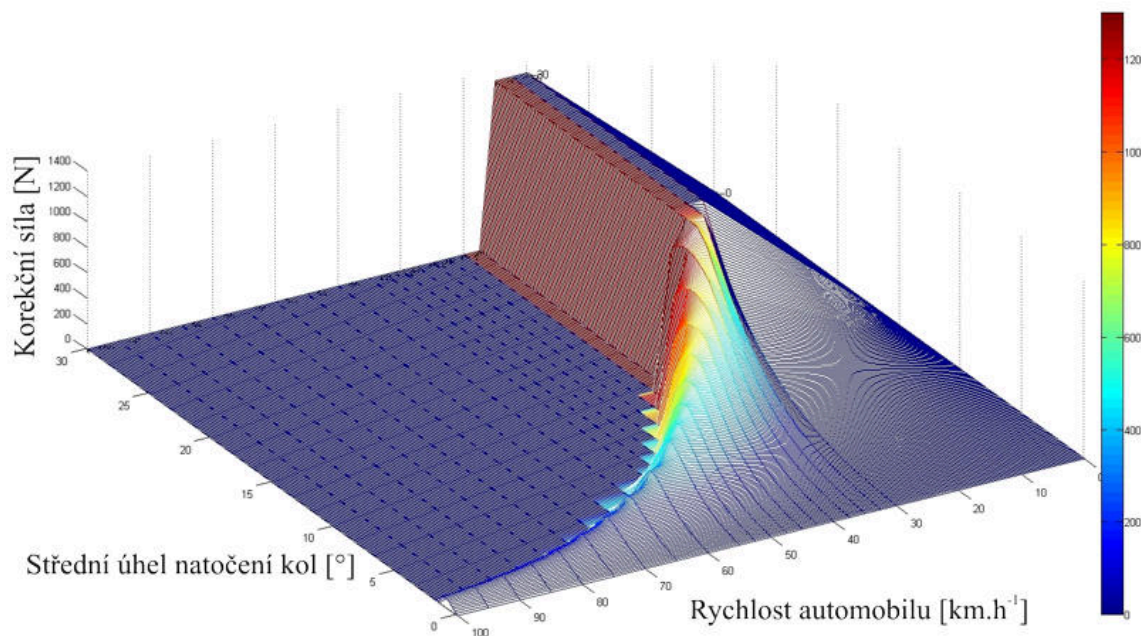
Při použití elektrického brzdění dochází u vozidla v pohybu nejdříve k rekuperačnímu brzdění, a poté k protiproudému brzdění. Zatímco rekuperační brzdění navrácí energii zpět do baterie, protiproudé energii spotřebovává. Obecně je moment potřebný pro brzdění vozu větší než moment, který může poskytnout elektromotor, zvláště v případě prudkého brzdění. Ve vozidle s elektrickým pohonem musí elektrické rekuperační brzdění úzce spolupracovat se standardními mechanickými brzdami. Vystává otázka, jak rozdělit celkový brzdny moment mezi rekuperační brzdění a mechanické brzdy tak, aby bylo rekuperováno co možná největší množství brzdě energie. Dále je nutné určit okamžik, kdy je potřeba funkci elektrických brzd deaktivovat.

Ad 4) Stabilizace vozidla je funkce, která vznikne kombinací předešlých funkcí a bude nadřazená nad těmito funkcemi. Ve vozidle je uvažována metoda zlepšení stabilizace vozidla při průjezdu zatáčkou nastavením rozdílných momentů na vnitřní a vnější kolo. Tímto dojde sice k porušení funkce elektronického diferenciálu, ale je možno korigovat nedotáčivost vozidla. Vystává zde nutnost použití dalších typů snímačů pro:

- natočení volantu
- podélné a příčné zrychlení

Faktorem stability  $K$  se posuzují vlastnosti vozidla. Je-li  $K = 0$ , má vozidlo neutrální vlastnosti, pro  $K > 0$  se chová nedotáčivě a pro  $K < 0$  přetáčivě. Platí, že stáčivý moment působící na automobil je složen ze dvou složek:

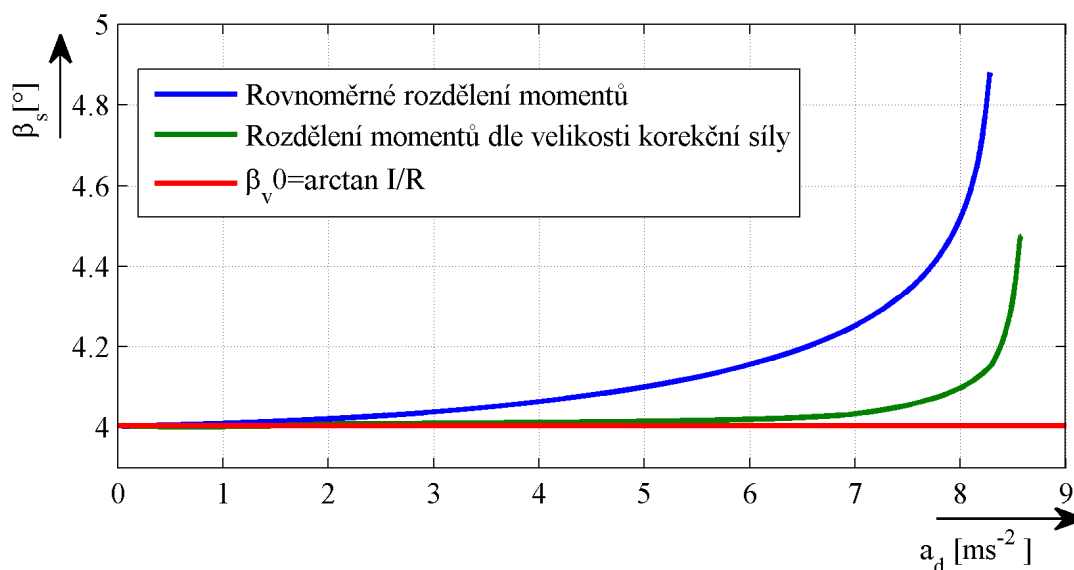
- a) moment vytvořený hnacími silami
- b) moment vytvořený korekční silou



Obr. 3.1 Mapa korekční síly v závislosti na středním úhlu natočení kol a rychlosti automobilu

Je tedy nutné zajistit, aby nevznikl moment stáčivý. Toto je možné provést právě nastavením různých momentů na vnitřní a vnější kolo v závislosti na úhlu natočení kol.

Na dalším obrázku můžete vidět charakteristiku zatáčivosti při rovnoměrném rozdělení momentů na obě kola nápravy a při rozdělení momentů dle korekční síly vycházející z rychlosti vozidla a středním úhlu natočení kol pro poloměr zatáčky  $R = 35 \text{ m}$ .



Obr. 3.2 Charakteristika zatáčivosti pro  $R = 35 \text{ m}$

### 3.2 Modely ED a simulační výsledky

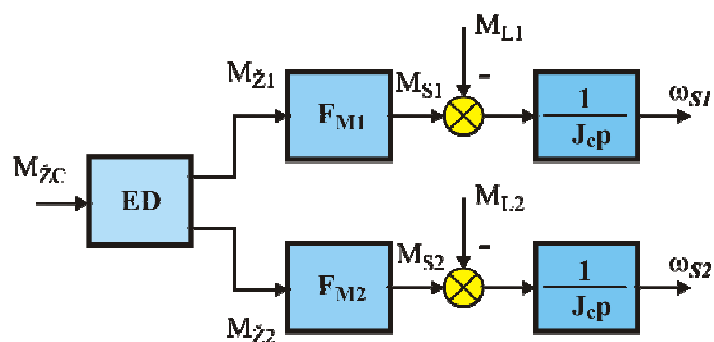
Simulační model elektronického diferenciálu byl vytvořen v prostředí MATLAB/Simulink. Model slouží pro ověření funkčnosti navržených algoritmů ED. Jako základ simulace byl zvolen stejnosměrný motor 2SM160S (Tab. 3.1) o výkonu 4,8 kW. Model umožňuje regulaci jak otáček, tak momentu.

Jmenovité otáčky	$n_N$	1400	[rpm]
Jmenovitý moment	$M_N$	35	[Nm]
Jmenovitý proud	$I_N$	13	[A]
Moment setrvačnosti	$J_C$	$95 \cdot 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]
Konstanta motoru	$c\phi$	2,72	[Vs]

Tab. 3.1 Parametry SS motoru 2SM160S

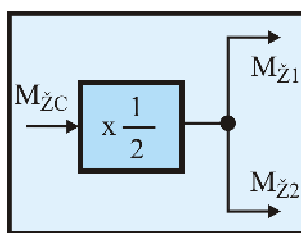
#### 3.2.1 Model ED

Blokové schéma na Obr. 3.3 představuje simulační model ED. Vstupní hodnotou soustavy je celkový žádaný moment, který můžeme přirovnat k plynovému pedálu ve vozidle. Blok ED rozděluje celkový moment dle rovnice 3.3 na žádané momenty jednotlivých motorů  $M_{Z1}$ ,  $M_{Z2}$ . Pomocí zatěžovacích momentů  $M_{L1}$ ,  $M_{L2}$  je simulována zátěž jednotlivých motorů při průjezdu vozidla zatáčkou tak, že vnější kolo je v zatáčce odlehčeno, zatímco vnitřní kolo je zatíženo o stejnou část momentu.



Obr. 3.3 Blokové schéma simulačního modelu elektronického diferenciálu

$$M_{z1} = M_{z2} = \frac{M_{zc}}{2} \quad [Nm; Nm] \quad (3.3)$$

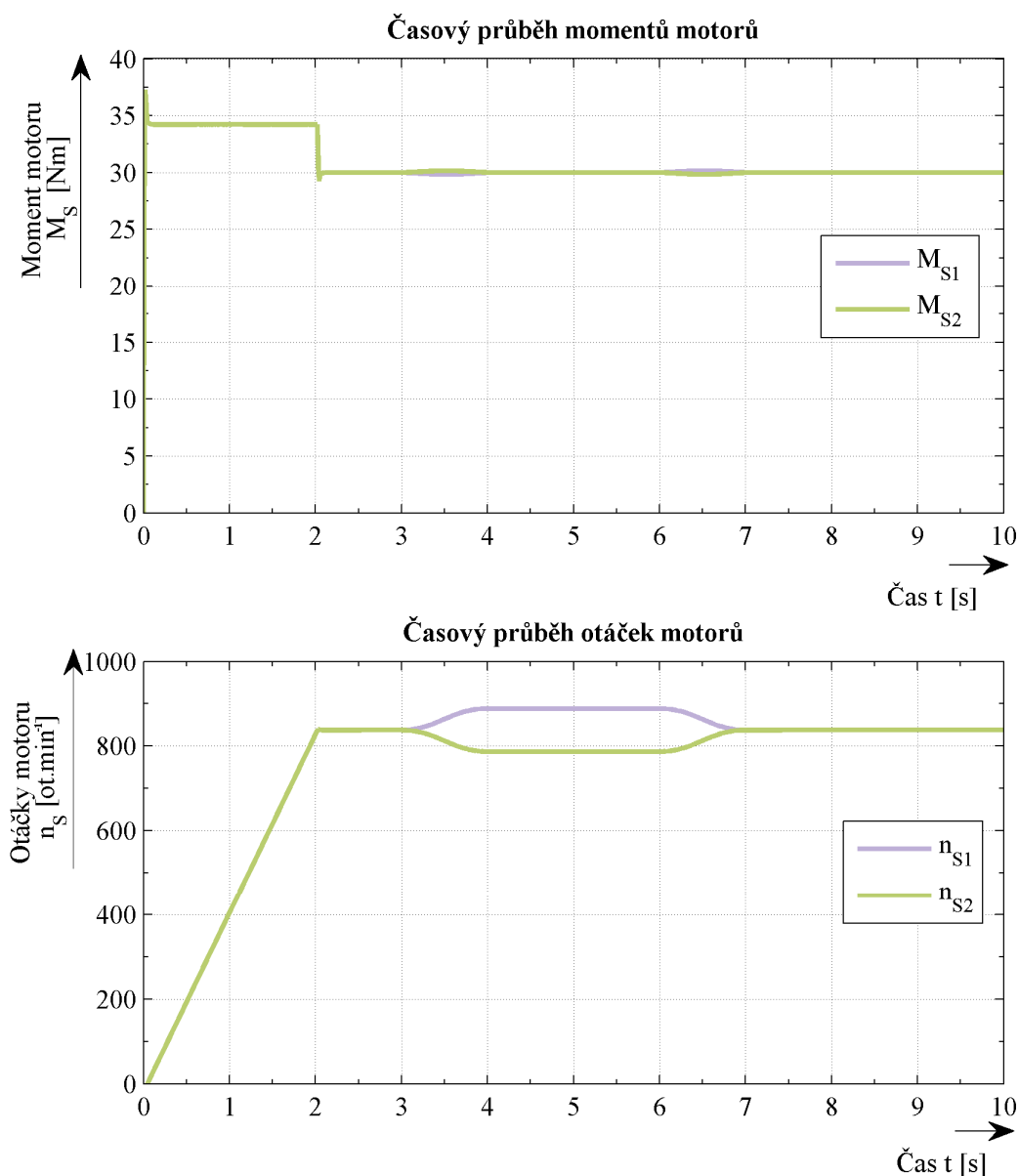


Obr. 3.4 Funkce bloku ED

Při simulaci byl při rozjezdu nastaven na oba motory stejný moment zátěže a zatáčka byla nasimulována změnou těchto momentů.

Jak lze pozorovat z Obr. 3.5 skutečné otáčky motoru při průjezdu zatáčkou jsou rozdílné, což je korektní chování diferenciálu.





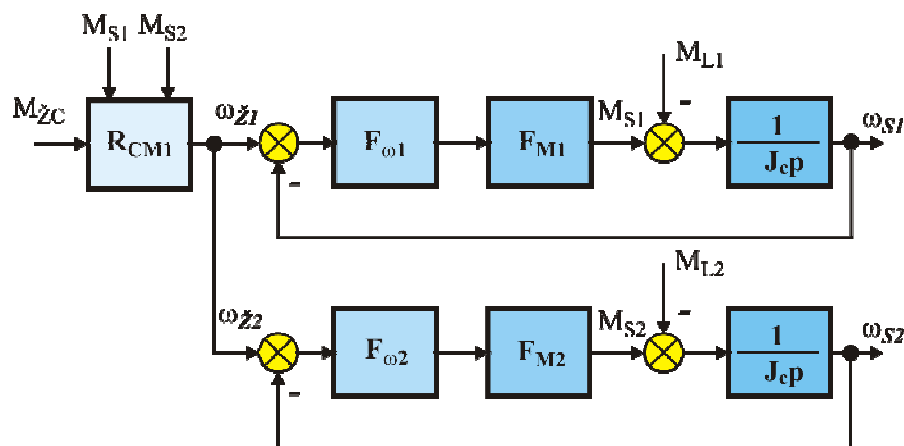
*Obr. 3.5 Simulační výsledky ED při průjezdu vozidla zatáčkou*

Bude-li použit blok ED dle *Obr. 3.4*, tak na obou motorech budou nastaveny stejné hodnoty žádaného momentu. Avšak pouze změnou algoritmu rozdělení momentů je možno nastavit různé momenty na oba motory viz kapitola 3.1.2.

### 3.2.2 Model uzávěrky ED – Metoda 1

Základem modelu uzávěrky ED – Metoda 1 (Obr. 3.6) jsou motory s regulací momentu a nadřazenou otáčkovou smyčkou. Vstupem soustavy je opět celkový žádaný moment. Ten spolu se skutečnými momenty motorů  $M_{S1}$ ,  $M_{S2}$  vstupují do bloku regulátoru celkového momentu  $R_{CM1}$ , který je realizován I regulátorem momentu, jehož výstupem jsou žádané otáčky jednotlivých otáčkových smyček motorů.

V tomto modelu je simulována náhlá změna zatěžovacího momentu, kdy změna zatěžovacího momentu na jednom kole se musí projevit opačnou změnou na kole druhém, přičemž otáčky obou motorů se při těchto situacích nesmí měnit.

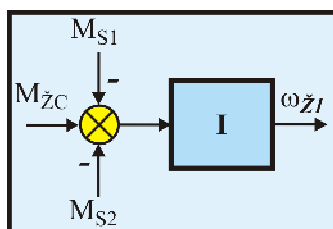


Obr. 3.6 Blokové schéma modelu uzávěrky elektronického diferenciálu dle Metody 1

Funkce bloku  $R_{CM1}$  je zobrazena na následujícím obrázku. Dochází zde k odečtení momentů  $M_{S1}$  a  $M_{S2}$  od žádané hodnoty celkového momentu  $M_{ZC}$ .

$$e_{M_{ZC}} = M_{ZC} - M_{S1} - M_{S2} \quad [Nm; Nm] \quad (3.4)$$

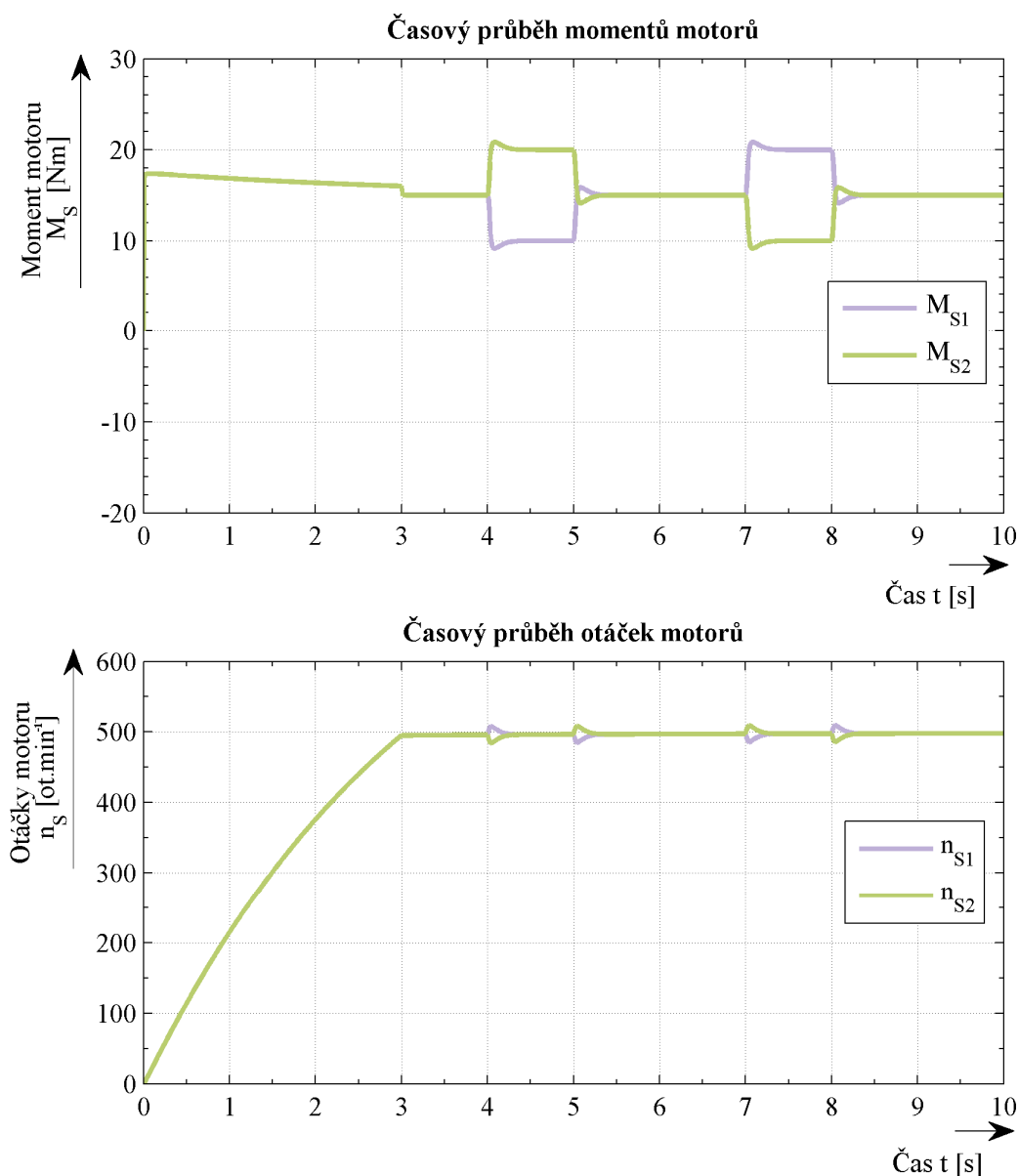
Regulační odchylka poté vstupuje do I regulátoru s omezením maximálních žádaných otáček.



Obr. 3.7 Funkce bloku  $R_{CM1}$

Na Obr. 3.8 je zobrazen průběh veličin obou motorů při skokových změnách zatěžovacích momentů v časech  $t = 4$  s a  $t = 7$  s.  $M_{ZC}$  je nastaven na 35 Nm a v čase  $t = 3$  s snížen na 30 Nm.

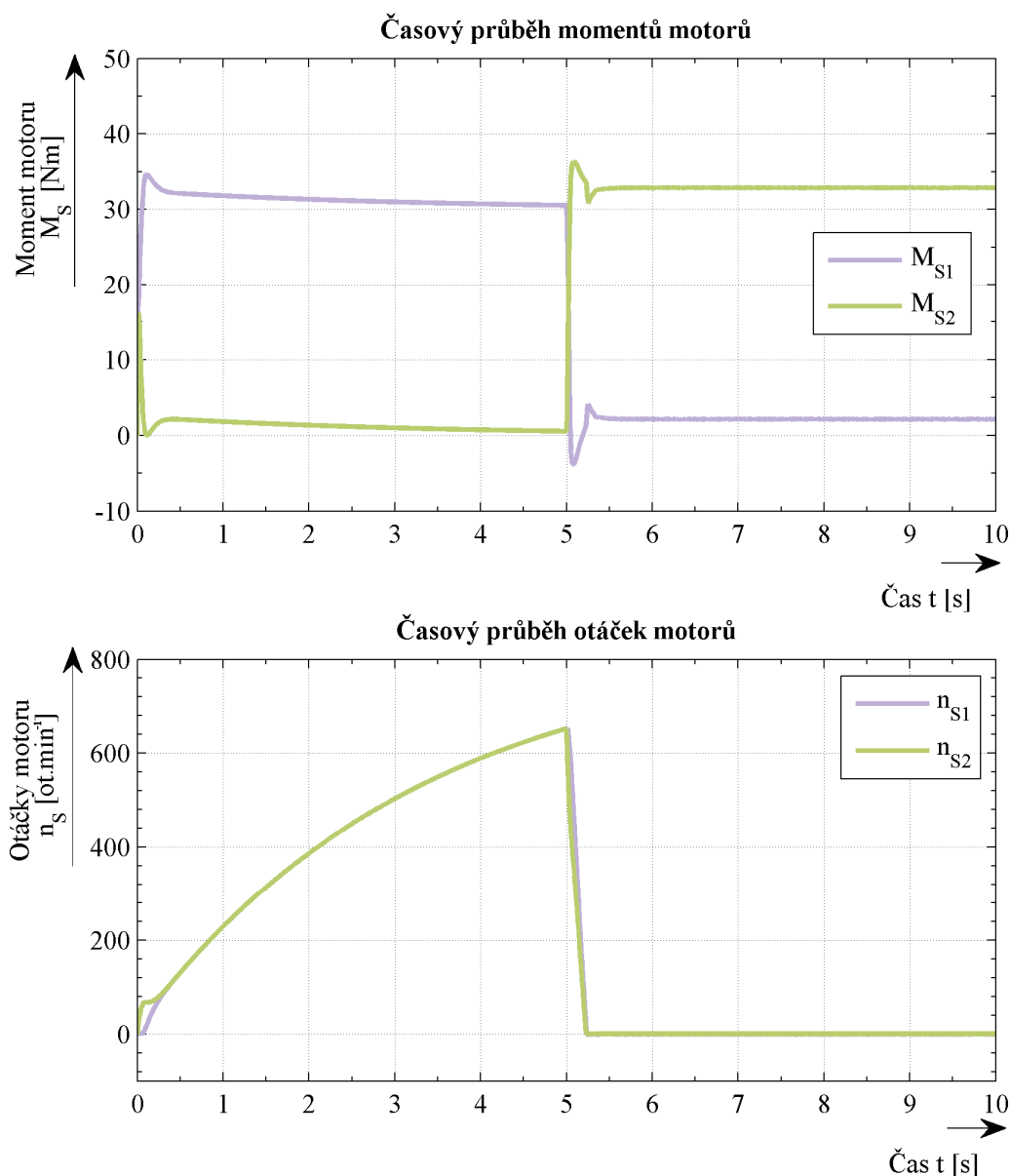
Jak lze pozorovat, skoková změna zatěžovacích momentů vyvolá přechodový jev v průběhu otáček motorů, rozdíl otáček je maximálně  $25 \text{ min}^{-1}$  při rozdílu zatěžovacích momentů 10 Nm.



Obr. 3.8 Simulační výsledky uzávěrky ED při náhodné poruše – Metoda 1 I-regulátor

Dále byla uzávěrka podrobována simulačnímu testu, kdy nejprve došlo k roztočení motorů a poté došlo k zastavení motoru 2 a bylo zkoumáno chování uzávěrky.

Moment zátěže motoru 2 byl nastaven na  $0 \text{ Nm}$ . Moment zátěže motoru 1 byl nastaven na  $30 \text{ Nm}$ .  $M_{\text{žc}}$  byl po celou dobu simulace nastaven na  $35 \text{ Nm}$ .



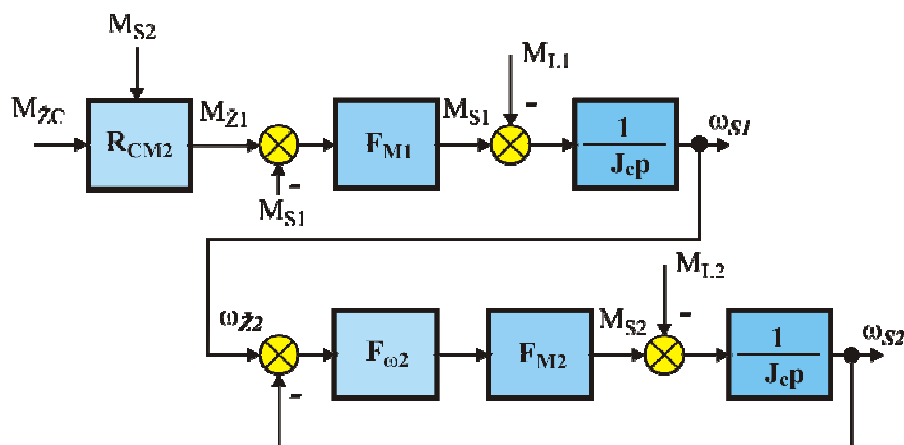
Obr. 3.9 Simulační výsledky uzávěrky ED rozjezdu a zastavení motoru 2, Metoda 1 I-regulátor

Na soustavu byl přiveden žádaný moment a oba motory se rotočily. Při zastavení kola 2 (simulovaným nastavením velké hodnoty zátěžného momentu motoru v čase  $t = 5 \text{ s}$ ), motor 1 okamžitě sleduje otáčky motoru 2 a obě kola se zastaví téměř okamžitě.

Jak vyplývá z průběhů uzávěrky mechanického diferenciálu, tato metoda v simulovaných situacích pracuje dle předpokladů a bude ověřená na reálném vozidle.

### 3.2.3 Model uzávěrky ED – Metoda 2

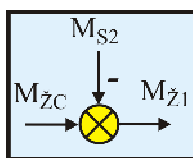
U modelu uzávěrky ED – Metoda 2 (Obr. 3.10) má první motor implementovánu pouze regulaci momentu a druhý obsahuje navíc nadřazenou otáčkovou smyčku. Vstupem soustavy je opět celkový žádaný moment. Ten spolu se skutečným momentem motoru 2  $M_{S2}$  vstupuje do bloku regulátoru celkového momentu  $R_{CM2}$ . Výstupem tohoto bloku je žádaný moment motoru 1.



Obr. 3.10 Blokové schéma modelu uzávěrky elektronického diferenciálu dle Metody 2

Funkce bloku  $R_{CM2}$  je zobrazena na následujícím obrázku. Dochází zde k odečtení momentu  $M_{S2}$  od žádané hodnoty celkového momentu  $M_{zc}$ .

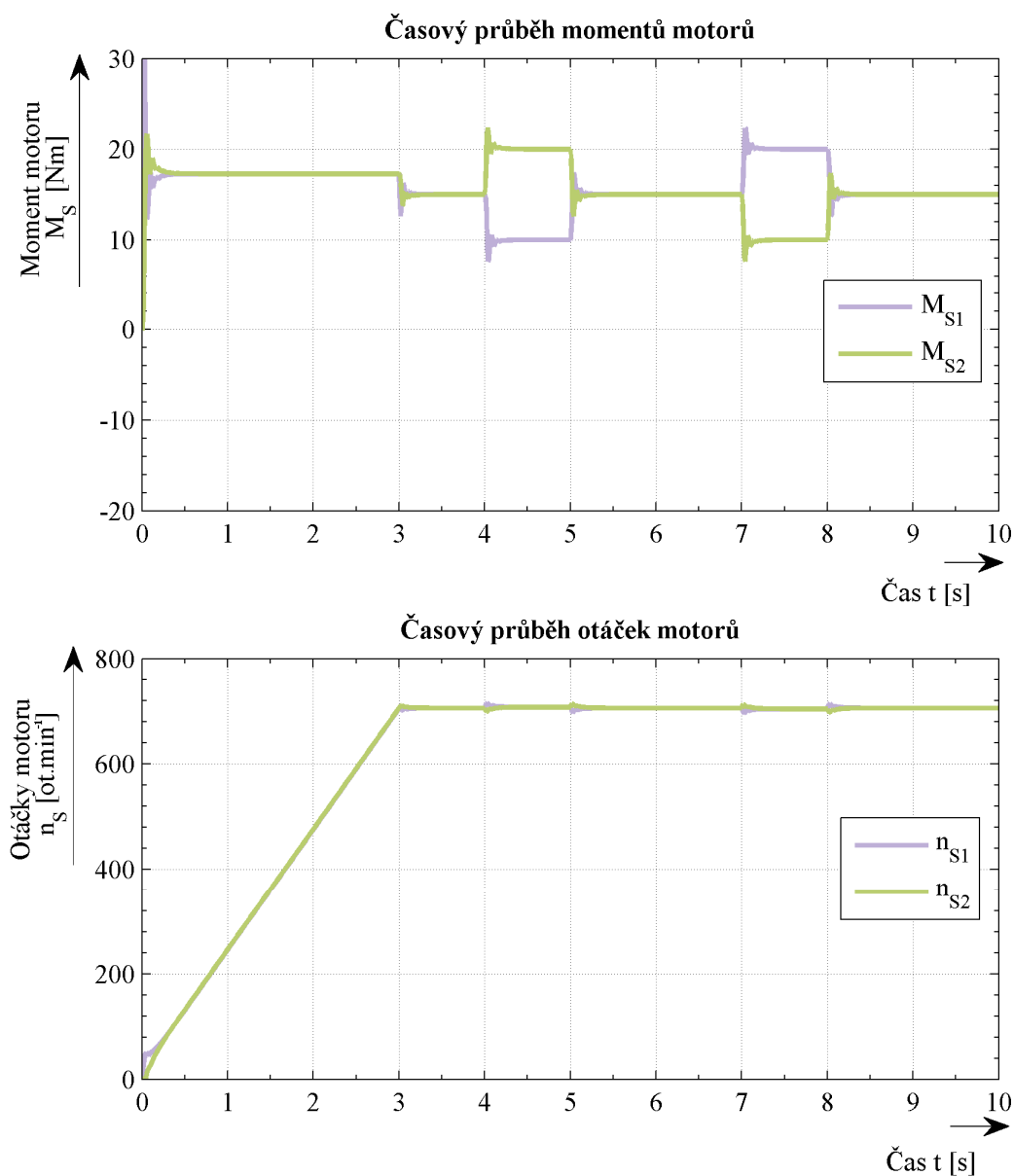
$$M_{z1} = M_{zc} - M_{S2} \quad [Nm; Nm] \quad (3.5)$$



Obr. 3.11 Funkce bloku  $R_{CM2}$

Na Obr. 3.12 je zobrazen průběh veličin obou motorů při skokových změnách zatěžovacích momentů v časech  $t = 4 \text{ s}$  a  $t = 7 \text{ s}$ .  $M_{zc}$  je nastaven na  $35 \text{ Nm}$  a v čase  $t = 3 \text{ s}$  snížen na  $30 \text{ Nm}$ .

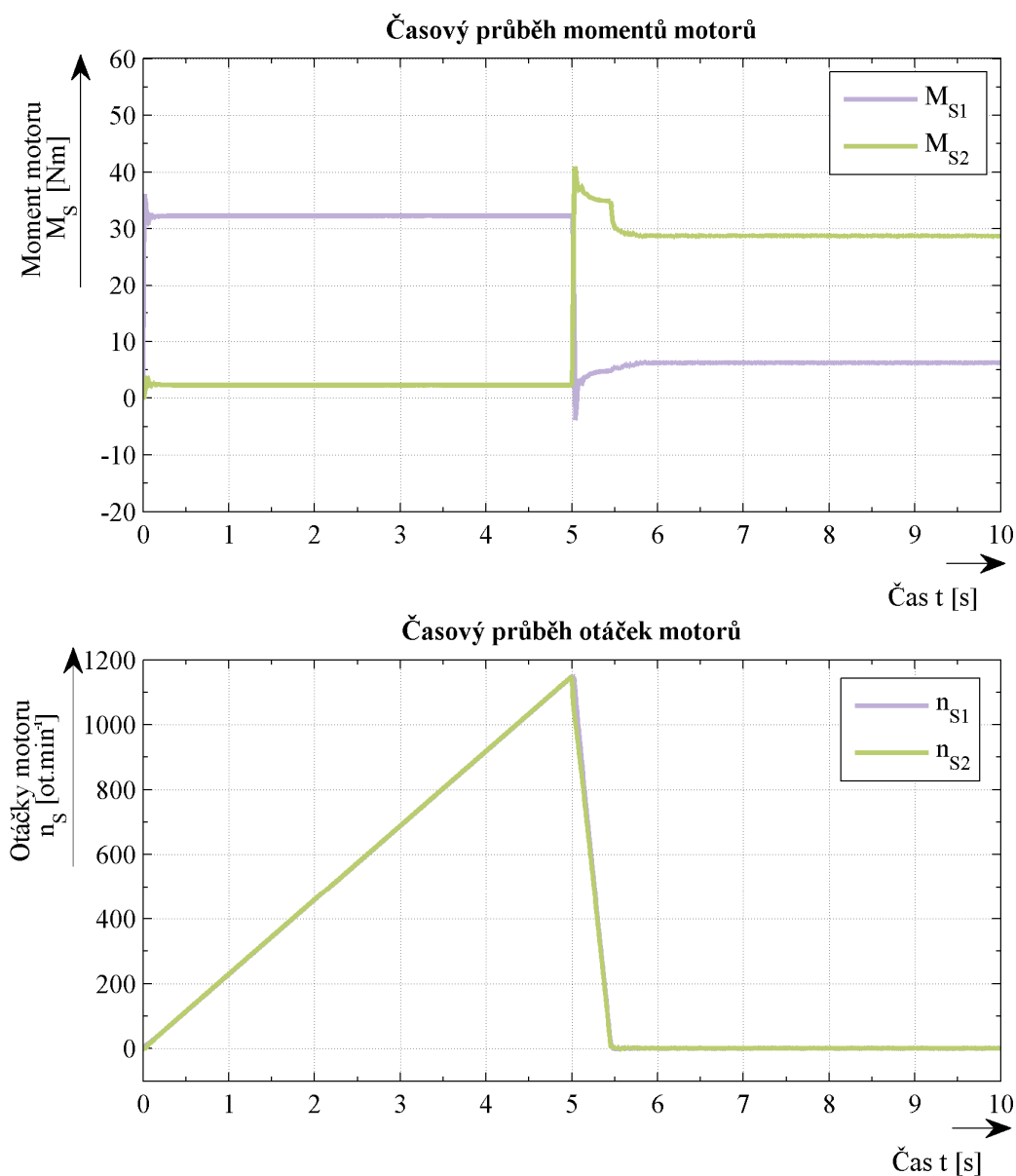
Jak lze pozorovat skoková změna zatěžovacích momentů vyvolá přechodový jev v průbězích otáček motorů. Rozdíl otáček je maximálně  $16 \text{ min}^{-1}$  při rozdílu zatěžovacích momentů  $10 \text{ Nm}$ .



*Obr. 3.12 Simulační výsledky uzávěrky ED při náhodné poruše, Metoda 2*

Také u této metody bylo zkoumáno chování při zablokování motoru 2.

Moment zátěže motoru 2 byl nastaven na  $0\text{ Nm}$ . Moment zátěže motoru 1 byl nastaven na  $30\text{ Nm}$ .  $M_{\text{žc}}$  byl po celou dobu simulace nastaven na  $35\text{ Nm}$ .



*Obr. 3.13 Simulační výsledky uzávěrky ED rozjezdu a zastavení motoru 2, Metoda 2*

Jak lze vidět na *Obr. 3.13*, je-li zastaven motor 2 (simulovaným nastavením velké hodnoty zátěžného momentu motoru v čase  $t = 5 \text{ s}$ ), dochází ke snížení jeho otáček a rovněž motor 1 sleduje tyto otáčky, až se oba dva motory zastaví.

Ze simulací metody 2 vyplývá, že metoda pracuje taktéž velice dobře a je vhodná pro implementaci v reálném vozidle s elektrickým pohonem.

## 4 Metody řízení asynchronního stroje

V této kapitole je vysvětlen princip dvou metod řízení momentu/otáček asynchronního motoru (AM). V první fázi vývoje bylo vozidlo vybaveno starším typem měniče s řízením zaměřujícím se na udržení konstantního magnetického toku stroje. Tento typ řízení bude spolu s novým typem měniče nahrazen nejdříve vektorovým řízením asynchronního motoru a poté metodou přímého řízení momentu dle Takahashiho. Tyto algoritmy byly vybrány z důvodů možnosti řízení, jak momentu, tak i otáček. Výhodou je přechod do generátorického režimu kvůli rekuperaci energie zpět do akumulátorové baterie [8] [9].

### 4.1 Matematický model asynchronního motoru

Chceme-li přistoupit k popisu asynchronního motoru, je nutné přijmout následující předpoklady vedoucí ke zjednodušení problému [9] [10] [11] [12]:

- *Vinutí jednotlivých fází jsou prostorově symetricky rozložena v drážkách statoru a rotoru;*
- *odpory a indukčnosti jednotlivých fází statoru i rotoru jsou shodné,*
- *magnetizační charakteristika je lineární;*
- *rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře je harmonické;*
- *není respektován skinefekt;*
- *nejsou respektovány ztráty v železe.*

U matematického modelu asynchronního stroje jsou všechny rotorové veličiny přepočítávány na stator. Symbolicko-komplexní metoda je použitelná jenom tehdy, má-li stroj elektricky i magneticky symetrické obvody statoru a rotoru, což je u asynchronního motoru splněno vždy. V následujících rovnicích jsou použity prostorové vektory, které zjednoduší matematický model asynchronního stroje [9] [11] [12].

Pro napětí jedné fáze asynchronního motoru platí:

$$u_{1a} = R_1 i_{1a} + \frac{d\Psi_{1a}}{dt} \quad (4.1)$$

Napěťová rovnice stator a rotor s použitím prostorových vektorů pak bude:

$$\underline{u}_1^S = R_1 \underline{i}_1^S + \frac{d\underline{\Psi}_1^S}{dt} \quad (4.2)$$

$$\underline{u}_2^R = R_2 \underline{i}_2^R + \frac{d\underline{\Psi}_2^R}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

Prostorový vektor spřaženého magnetického toku statoru můžeme vyjádřit pomocí vztahu:

$$\underline{\Psi}_1^S = L_1 \underline{i}_1^S + L_h \underline{i}_2^R e^{j\varepsilon} \quad (4.4)$$

Obdobně pro rotor bude platit:

$$\underline{\Psi}_2^R = L_2 \underline{i}_2^R + L_h \underline{i}_1^S e^{-j\varepsilon} \quad (4.5)$$



Dosazením vztahů (1.19.) a (1.20.) do (1.17.) a (1.18.) dostáváme soustavu diferenciálních rovnic popisující chování dvoupólového asynchronního motoru:

$$R_1 \underline{i}_1^S + L_1 \frac{d\underline{i}_1^S}{dt} + L_h \frac{d}{dt} (\underline{i}_2^R e^{j\varepsilon}) = \underline{u}_1^S \quad (4.6)$$

$$R_2 \underline{i}_2^R + L_2 \frac{d\underline{i}_2^R}{dt} + L_h \frac{d}{dt} (\underline{i}_1^S e^{-j\varepsilon}) = 0 \quad (4.7)$$

$$J_c \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} L_h \operatorname{Im} \left[ \underline{i}_1^S (\underline{i}_2^R e^{j\varepsilon})^* \right] - M_{PM} \quad (4.8)$$

$$\omega_m = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad [\text{rads}^{-1}; \text{rad}, s] \quad (4.9)$$

Celkové indukčnosti  $L_1, L_2$  lze vyjádřit vztahy:

$$L_1 = (1 + \sigma_1) L_h \quad (4.10)$$

$$L_2 = (1 + \sigma_2) L_h \quad (4.11)$$

Kde  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou činitelé rozptylu určeny vztahy:

$$\sigma_1 = \frac{L_{1\sigma}}{L_h} = \frac{L_1}{L_h} - 1 \quad (4.12)$$

$$\sigma_2 = \frac{L_{2\sigma}}{L_h} = \frac{L_2}{L_h} - 1 \quad (4.13)$$

Výsledný činitel rozptylu je pak určen vztahem:

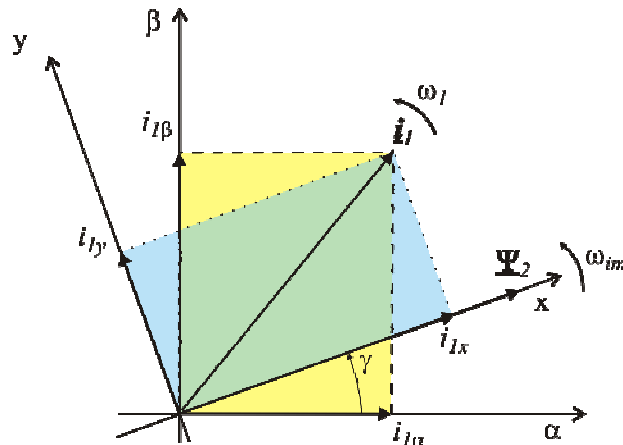
$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_1 L_2} \quad (4.14)$$

## 4.2 Vektorové řízení

Důležitou podmínkou pro vektorové řízení střídavého motoru je oddělení regulačních obvodů momentu a magnetického toku tak, aby se vzájemně neovlivňovaly. Princip spočívá v rozložení prostorového vektoru statorového proudu do kolmých složek rotujících v souřadnicovém systému, který je orientován na prostorový vektor rotorového magnetického toku, složky pak určují moment a magnetizaci stroje. Je nutno dodat, že tato metoda vyžaduje snímač otáček na motoru [9] [13] [14].

Použita je klasická metoda vektorového řízení, kde je prostorový vektor statorového proudu rozložen na dvě navzájem kolmé složky v orientovaném systému souřadnic  $[x, y]$  rotujícím s úhlovou rychlostí  $\omega_{im}$ , kde:

- $\underline{i}_{1x}$  *reprezentuje magnetizaci stroje;*
- $\underline{i}_{1y}$  *reprezentuje moment stroje.*



Obr. 4.1 Rozložení prostorového vektoru statorového proudu

Kde  $[\alpha, \beta]$  označuje statorový systém souřadnic a  $[x, y]$  orientovaný souřadnicový systém. Úhel  $\gamma$  je úhel mezi systémem  $[\alpha, \beta]$  a orientovaným systémem  $[x, y]$ .

Na prostorový vektor v orientovaném systému souřadnic jsou aplikovány následující rovnice:

$$\mathbf{i}_I^O = i_{1x} + j i_{1y} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{i}_m^O = i_{mx} = i_m \quad (4.16)$$

$$\mathbf{u}_I^O = u_{1x} + j u_{1y} \quad (4.17)$$

Chování asynchronního motoru v systému orientovaných souřadnic je popsáno následujícími rovnicemi [9].

$$\sigma T_s \frac{d(i_{1x})}{dt} + i_{1x} = \frac{u_{1x}}{R_s} + \omega_{im} \sigma T_s i_{1y} - (1 - \sigma) T_s \frac{d(i_m)}{dt} \quad (4.18)$$

$$\sigma T_s \frac{d(i_{1y})}{dt} + i_{1y} = \frac{u_{1y}}{R_s} - \omega_{im} \sigma T_s i_{1x} - (1 - \sigma) \omega_{im} T_s i_m \quad (4.19)$$

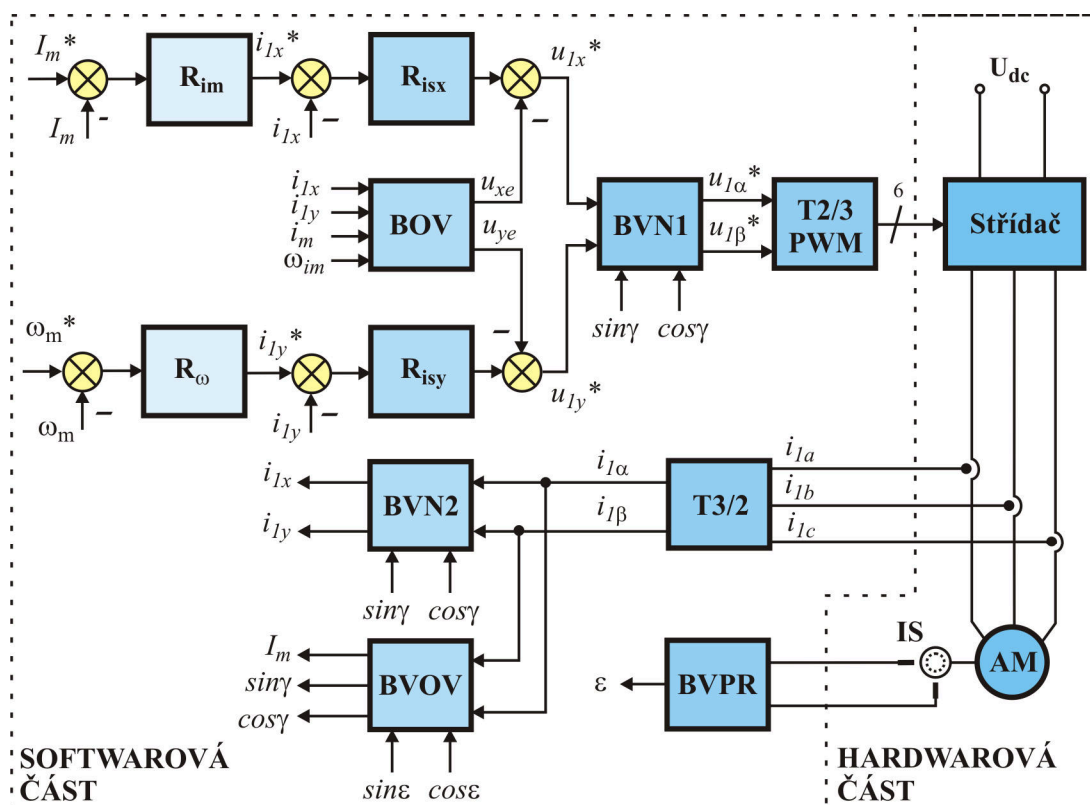
$$T_R \frac{d(i_m)}{dt} + i_m = i_{Ix} \quad (4.20)$$

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_m = \frac{1}{i_m T_R} i_{1y} \quad (4.21)$$

$$J \frac{d(\omega_m)}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_h}{1 + \sigma_R} i_m i_{1y} - m_z \quad (4.22)$$

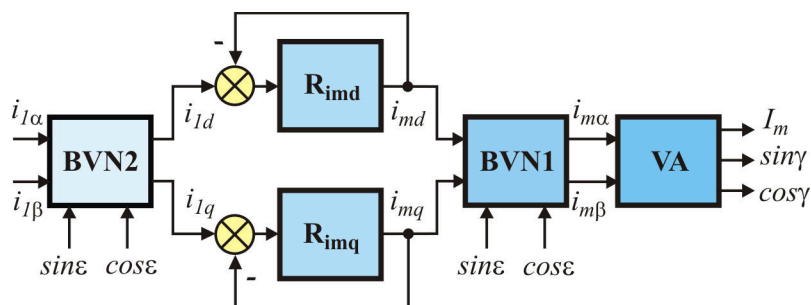
$$\omega_m = \frac{d(\varepsilon)}{dt}, \omega_{im} = \frac{d(\gamma)}{dt}, \omega_1 = \omega_{im} + \frac{d(\delta)}{dt} = \frac{d(\zeta)}{dt} \quad (4.23)$$

Algoritmus vektorového řízení je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 4.2 Vektorové řízení AM v systému orientovaných souřadnic

Pro vyhodnocení magnetizačního proudu a orientujících veličin je použit proudový model (blok BVOV). Tento blok je detailně zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 4.3 Blok vyhodnocení magnetizačního proudu a orientujících veličin

S pomocí vektorového natočení 2 jsou vypočteny složky proudu  $i_{Ld}$ ,  $i_{Lq}$ , v rotorovém systému souřadnic, které se použijí k vyhodnocení složek magnetizačního proudu  $i_{md}$ ,  $i_{mq}$ . Blok vektorového natočení 2 vytvoří složky vektoru magnetizačního proudu v statorovém systému souřadnic  $i_{m\alpha}$ ,  $i_{m\beta}$ . Z těchto složek je pomocí vektorového analyzátoru vypočten modul magnetizačního proudu  $I_m$  a  $\sin\gamma$ ,  $\cos\gamma$ [9].

Otáčkový regulátor, je-li zařazen, vytváří na základě rozdílu mezi žádanou hodnotou rychlosti a skutečnou hodnotou rychlosti žádanou hodnotu imaginární složky proudu  $i_{Ly}^*$ , která charakterizuje moment stroje. Z tohoto vyplývá možnost řízení jak otáček, tak momentu stroje.

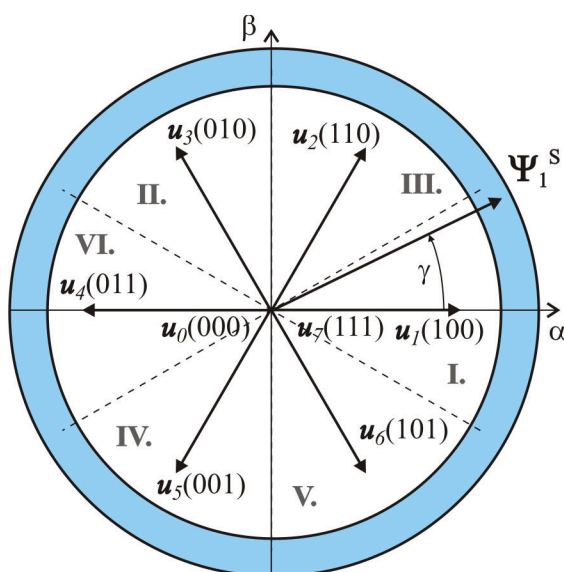
Regulátor magnetizačního proudu, je-li zařazen, vytváří žádanou hodnotu reálné složky proudu  $i_{Lx}^*$ , která charakterizuje magnetizaci stroje.

Regulátory  $R_{isx}$  ( $R_{isy}$ ) zpracovávají vstupní chybový signál a s pomocí bloku odstranění vazby vzniknou žádané hodnoty složek vektoru napětí, které s pomocí bloku vektorového a transformace 2/3 jsou vypočteny spínací kombinace pro střídač.

### 4.3 Přímé řízení momentu

Přímé řízení momentu se vyznačuje dobrými dynamickými vlastnostmi a jednoduchostí. Oproti tomu stojí vyšší hardwarové nároky na řídicí jednotku.

U Takahashiho metody řízení je koncový bod vektoru statorového magnetického toku udržován v mezikruží, viz Obr. 4.4 [8] [9] [15].



Obr. 4.4 Trajektorie statorového toku dle Takahashiho metody

Pomocí spínání aktivních vektorů ( $\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_6$ ) je vytvořené točivé magnetické pole statoru, jehož rychlost a potožmo i velikost momentu stroje lze řídit dvěma způsoby:

- spínání aktivních a nulových vektorů
- spínání pouze aktivních vektorů

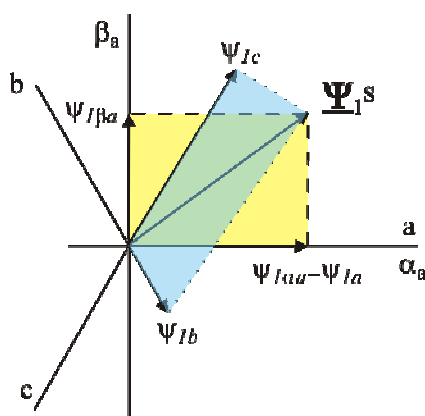
Spínací kombinace jednotlivých napěťových vektorů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Vektor napětí	$\mathbf{u}_0$	$\mathbf{u}_1$	$\mathbf{u}_2$	$\mathbf{u}_3$	$\mathbf{u}_4$	$\mathbf{u}_5$	$\mathbf{u}_6$	$\mathbf{u}_7$
Spínací kombinace	000	100	110	010	011	001	101	111

Tab. 4.1. Spínací kombinace pro jednotlivé napěťové vektory

Řízení momentu stroje  $m$  je prováděno dvupolohovým regulátorem.

$$m = k_m (\psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1\alpha}) \quad (4.24)$$



Obr. 4.5 Prostorový vektor magnetického statorového toku

Pro regulaci použijeme hysterezní regulátory, které popíšeme podle následujících vztahů, kde pro kladný směr otáčení vektoru magnetického toku (proti směru otáčení hodinových ručiček) platí:

$$(m_z - m) > H_m \rightarrow s_T = 1 \quad (4.25)$$

$$(m_z - m) < -H_m \rightarrow s_T = 0 \quad (4.26)$$

Pro záporný směr (ve směru otáčení hodinových ručiček) platí:

$$(m_z - m) > H_m \rightarrow s_T = 0 \quad (4.27)$$

$$(m_z - m) < -H_m \rightarrow s_T = 1 \quad (4.28)$$

A pro kladný i záporný směr otáčení vektoru magnetického toku platí:

$$(\psi_z - \psi_s) > H_q \rightarrow s_q = 1 \quad (4.29)$$

$$(\psi_z - \psi_s) < -H_q \rightarrow s_q = 0 \quad (4.30)$$

Tab. 4.2 a Tab. 4.3 zobrazují spínací kombinace pro sepnutí následujícího vektoru dle požadovaného směru otáčení při využití aktivních i nulových vektorů [8] [9].

s <sub>Q</sub>	s <sub>T</sub>	Sektor (znaménka $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}$ )					
		I -30° ÷ 30° (+, -, -)	III 30° ÷ 90° (+, +, -)	II 90° ÷ 150° (-, +, -)	VI 150° ÷ 210° (-, +, +)	IV 210° ÷ 270° (-, -, +)	V 270° ÷ 330° (+, -, +)
1	1	u <sub>2</sub>	u <sub>3</sub>	u <sub>4</sub>	u <sub>5</sub>	u <sub>6</sub>	u <sub>1</sub>
	0	u <sub>7</sub>	u <sub>0</sub>	u <sub>7</sub>	u <sub>0</sub>	u <sub>7</sub>	u <sub>0</sub>
0	1	u <sub>3</sub>	u <sub>4</sub>	u <sub>5</sub>	u <sub>6</sub>	u <sub>1</sub>	u <sub>2</sub>
	0	u <sub>0</sub>	u <sub>7</sub>	u <sub>0</sub>	u <sub>7</sub>	u <sub>0</sub>	u <sub>7</sub>

Tab. 4.2 Spínací tabulka pro kladný směr otáčení vektoru magnetického toku při využití aktivních i nulových vektorů

$s_Q$	$s_T$	Sektor (znaménka $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}$ )					
		I	III	II	VI	IV	V
		$-30^\circ \div 30^\circ$ (+, -, -)	$30^\circ \div 90^\circ$ (+, +, -)	$90^\circ \div 150^\circ$ (-, +, -)	$150^\circ \div 210^\circ$ (-, +, +)	$210^\circ \div 270^\circ$ (-, -, +)	$270^\circ \div 330^\circ$ (+, -, +)
1	1	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$
	0	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$
0	1	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$
	0	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$	$u_0$	$u_7$

Tab. 4.3 Spínací tabulka pro záporný směr otáčení vektoru magnetického toku při využití aktivních i nulových vektorů

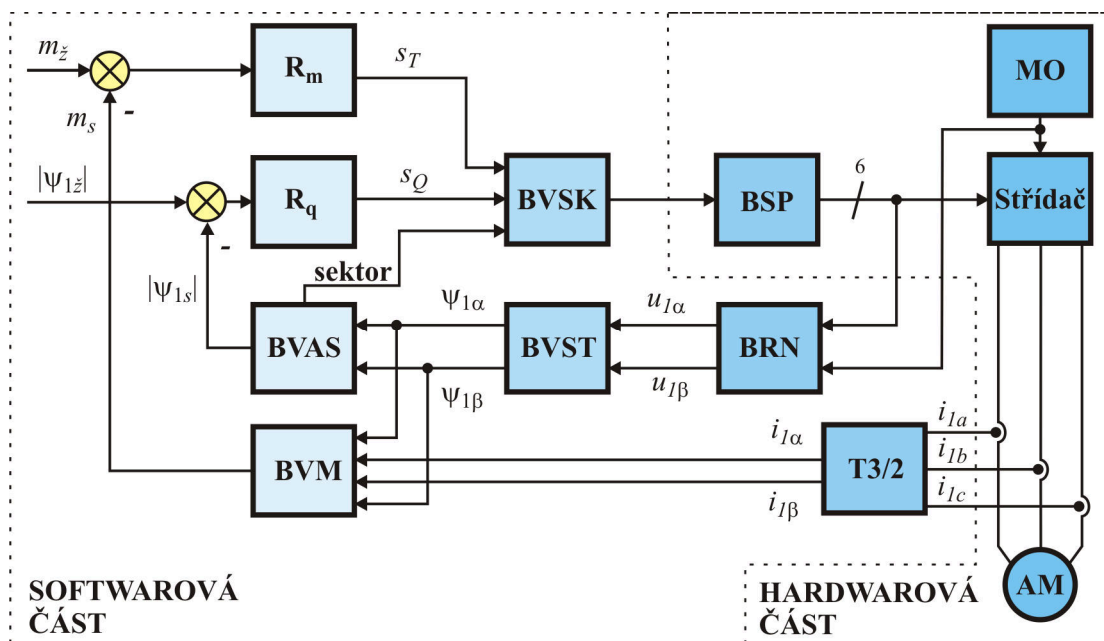
Další možnou modifikací této metody je spínání pouze aktivních vektorů. Požadujeme-li pokles momentu, je nutné, aby se vektor magnetického toku otáčel proti směru otáčení rotoru. Pro tento způsob musí být vytvořeny nové spínací tabulky, které lze jednoduše odvodit. Tab. 4.4 a Tab. 4.5 obsahují pouze aktivní vektory, tato metoda umožňuje rekuperaci energie [8] [9].

$s_Q$	$s_T$	Sektor (znaménka $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}$ )					
		I	III	II	VI	IV	V
		$-30^\circ \div 30^\circ$ (+, -, -)	$30^\circ \div 90^\circ$ (+, +, -)	$90^\circ \div 150^\circ$ (-, +, -)	$150^\circ \div 210^\circ$ (-, +, +)	$210^\circ \div 270^\circ$ (-, -, +)	$270^\circ \div 330^\circ$ (+, -, +)
1	1	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$
	0	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$
0	1	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$
	0	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$

Tab. 4.4 Spínací tabulka pro kladný směr otáčení vektoru magnetického toku při využití pouze aktivních vektorů

$s_Q$	$s_T$	Sektor (znaménka $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}$ )					
		I	III	II	VI	IV	V
		$-30^\circ \div 30^\circ$ (+, -, -)	$30^\circ \div 90^\circ$ (+, +, -)	$90^\circ \div 150^\circ$ (-, +, -)	$150^\circ \div 210^\circ$ (-, +, +)	$210^\circ \div 270^\circ$ (-, -, +)	$270^\circ \div 330^\circ$ (+, -, +)
1	1	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$
	0	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$
0	1	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$
	0	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_1$	$u_2$

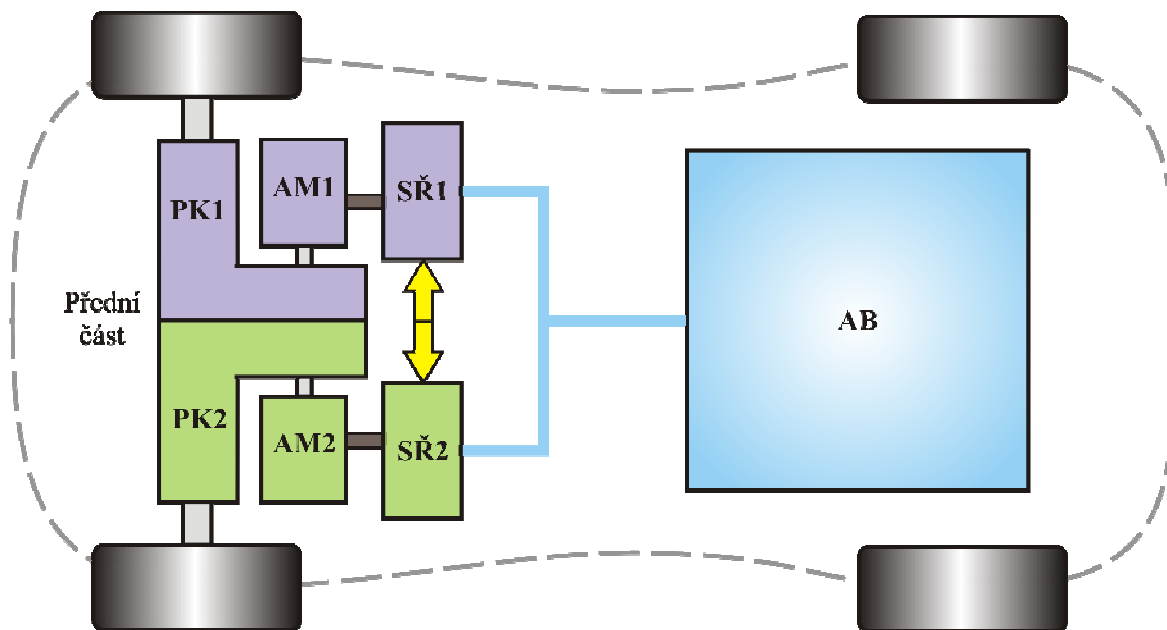
Tab. 4.5 Spínací tabulka pro záporný směr otáčení vektoru magnetického toku při využití pouze aktivních vektorů



*Obr. 4.6 Blokové schéma Takahashiho metody DTC*

## 5 Reálné vozidlo s elektrickým pohonem

### 5.1 Detailní popis vozidla s elektrickým pohonem



Obr. 5.1 Detailní rozvržení částí vozidla

Pohon je rozdělen na dvě části:

- Pohon pravého kola – značený indexy 1 a fialovou barvou
- Pohon levého kola – značený indexy 2 a zelenou barvou

Význam použitých zkratk je následující:

- PK – převodová skříň s konstantním převodem
- AM – asynchronní motor
- SŘ – napěťový střídač a řídicí jednotka
- AB – akumulátorová baterie

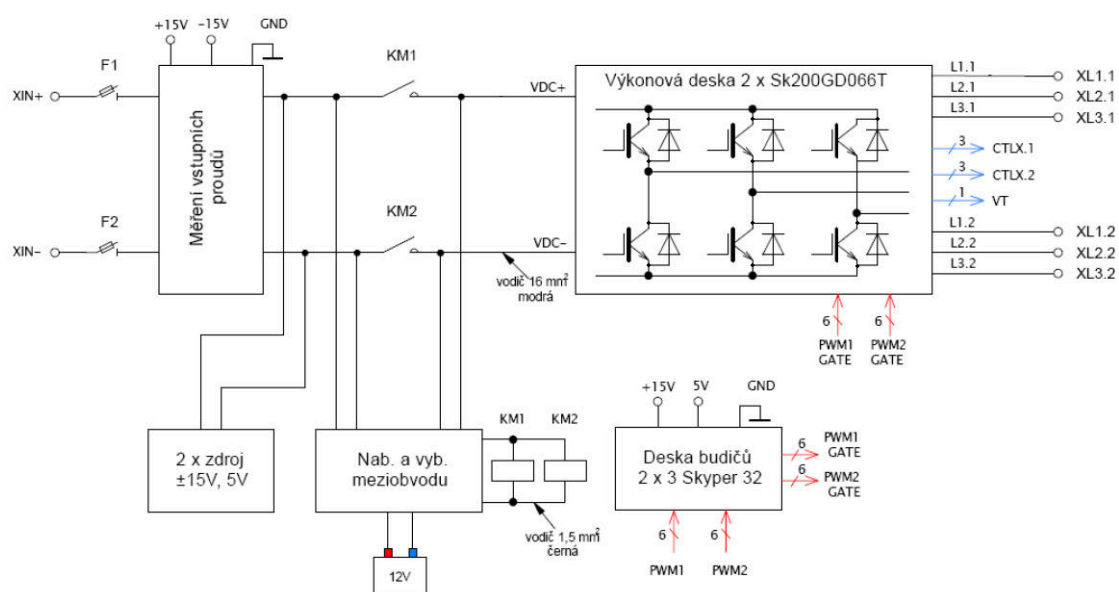
Převodová skříň je fyzicky vyrobena jako jeden kus, který ovšem obsahuje dvě nezávislé části, převodový poměr je konstantní a má hodnotu  $p = 6,01$ .

Ve všech následujících průbězích je index **1** spjatý s **pravým motorem (fialová barva)**, a tedy i kolem. Index **2** je spjatý s **levým motorem (zelená barva)** a kolem.

#### 5.1.1 Dvojitý střídač s napěťovým meziobvodem

Ve vozidle je použita nová koncepce střídače, kde dva střídače byly připojeny na jeden meziobvod a vloženy do jednoho šasi. Řídicí jednotky jsou umístěny v bezprostřední blízkosti budičů výkonových prvků. Blokové schéma dvojitého napěťového střídače je na následujícím obrázku (Obr. 5.2). Na Obr. 5.3 je zobrazen střídač zapojen v laboratorním stanovišti.





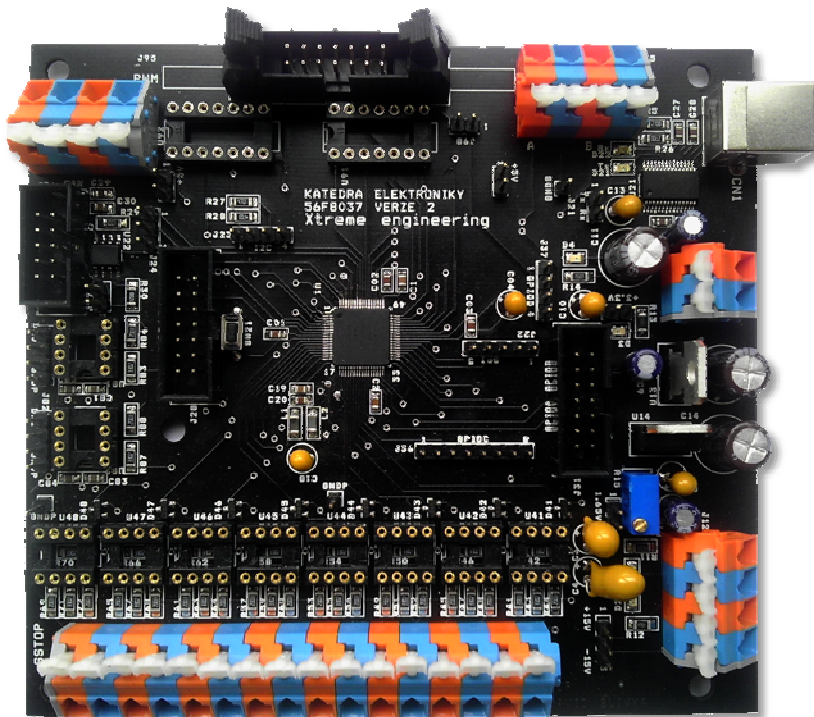
Obr. 5.2 Schéma dvojitého napětového střídače



Obr. 5.3 Dvojité napětový střídač zapojený v laboratorním stanovišti

### 5.1.2 Řídicí jednotka s DSC 56F8037

Signálový kontrolér z řady 56F800E vychází z hybridní technologie kombinující jednotku digitálního signálového procesoru (DSP) zajišťující vysoký výpočetní výkon v pevné řadové čáře a mikrokontroléru (MCU) s množstvím integrovaných periférií. Vybraný typ má výpočetní výkon 32 MIPS v pevné řadové čáře. DSC 56F8037 má integrováno 64 KB paměti FLASH a 8 KB jednotné paměti RAM pro data nebo program.



Obr. 5.4 Řídicí jednotka ve verzi 2.0

Řada 56F800E je založena na duální harvardské koncepci, která díky tomu umožňuje provedení až šesti operací v jednom instrukčním cyklu. Navíc jádro obsahuje osmi úrovně zřetězení instrukcí [16].

MCU obsahuje následující moduly a periférie: PWM, ADC, DAC, MSCAN, QSCI, QSPI, I2C, PIT, čtyři čítače/časovače a analogový komparátor. Každá může být individuálně vypnuta z důvodu snížení spotřeby energie. Zvláštností je, že periférie DSC jsou multiplexovány mezi jednotlivé vývody. Tímto je dosaženo úspory vývodů, ale v jednom okamžiku nelze používat všechny periférie [17].

### 5.1.3 Akumulátory

Akumulátorová baterie je složena z akumulátoru typu LiFePO<sub>4</sub> o napětí 3,2 V a jmenovité kapacitě 40 Ah. Celkové napětí je 320 V.

### 5.1.4 Použité asynchronní motory

V nynější verzi vozidla jsou umístěny dva synchronní sériově vyráběné motory Siemens - 1LA7 107-4AA na napětí 230/400 V o jmenovitém výkonu 3 kW. Motory mají plášť upravené pro vodní chlazení a počítá se s maximálním výkonem 9 kW na jeden motor, tedy s trojnásobným přetížením. Další parametry tohoto motoru jsou v následující tabulce:

Jmenovité otáčky	$n_N$	1420	[rpm]
Počet pólů	$p$	4	[-]
Jmenovitý moment	$M_N$	20,2	[Nm]
Jmenovitý proud	$I_N$	6,4	[A]
Moment setrvačnosti	$J_{mot}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]
Účinník	$\cos \varphi$	0,82	[-]

Tab. 5.1 Parametry použitého asynchronního motoru 1LA7 107-4AA

## 5.2 Implementace řídicích algoritmů

Pro tuto aplikaci byl vybrán digitální signálový kontrolér (DSC) Freescale 56F8037, viz kapitola 5.1.2 *Řídicí jednotka s DSC 56F8037*.

Vývoj řídicích algoritmů probíhal v nástrojích dodávaných přímo výrobcem. Do základního softwaru CodeWarrior IDE verze 5.9.0 Development Studio sloužícího pro vývoj programů všech DSC s jádrem 56800E byl přidán grafický konfigurační nástroj Quickstart verze 2.5. Byly nainstalovány knihovny zapouzdřených (z angl. embedded) funkcí Freescale Embedded software libraries verze 2.1.

Řídicí algoritmy využívají kromě funkcí z implementovaných knihoven i intrinsické funkce, které jsou napsány pro jádro 56800E a optimalizovány pro výpočty se zlomkovým typem čísel. Kde je to možné, jsou používány pouze proměnné tohoto typu. Znaménkové 16bitové čísla typu Fraction mají rozsah od -1 do 0,9997 a vyjádření tohoto čísla je následující:

$$N_{F16} = \frac{N_{S16}}{2^{15}} \quad (5.1)$$

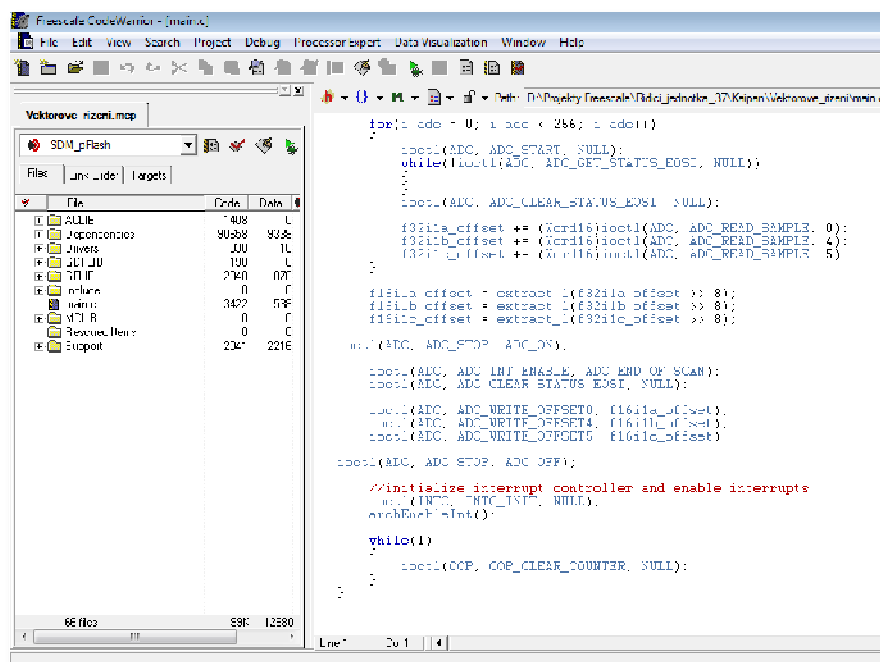
Kde je  $N_{F16}$  je vyjádření 16 bitového znaménkového zlomkového čísla a  $N_{S16}$  je znaménkové 16bitové celé číslo [18].

### 5.2.1 CodeWarrior a QuickStart

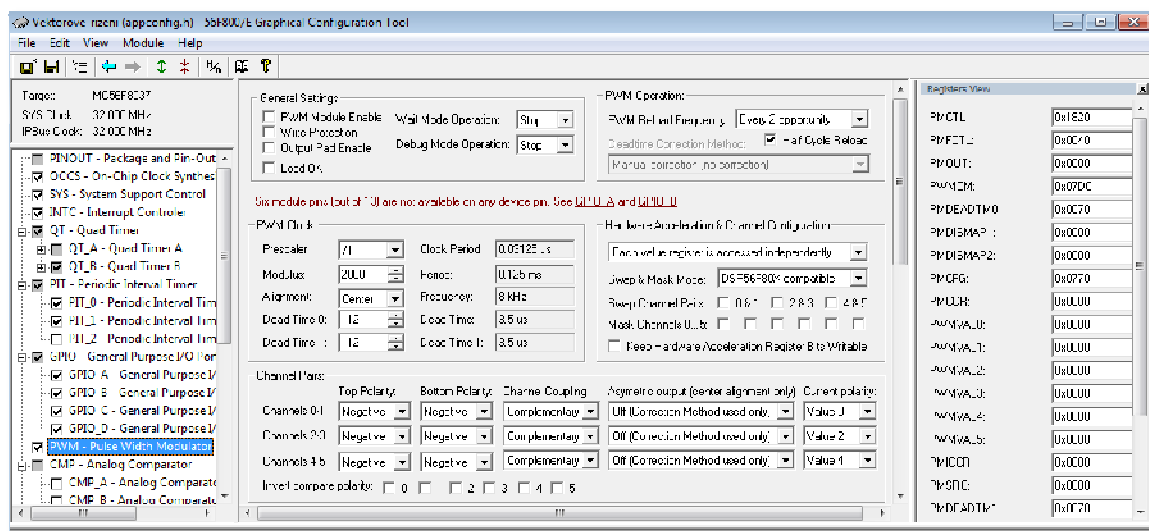
CodeWarrior studio podporuje jak jazyk C tak C++, Javu, a také assembler pro většinu procesorů. Umožňuje také instalaci dalších doplňků, které usnadní práci při vytváření složitějších programů [18] [19].

Pro ukládání a odlaďování programů slouží komunikační port JTAG/OnCE integrováno přímo na DSC. Díky rozhraní CodeWarrior USB TAP je tedy možno nahrávání programů do paměti DSC a zároveň také odlaďování kódu v reálném čase.

Pro zvýšení efektivity a zrychlení práce při vývoji nových programů byl vytvořen grafický konfigurační nástroj QuickStart. Ten umožňuje během krátké doby nastavit veškeré potřebné části digitálního signálového kontroléru. Ať už to je počáteční nastavení jádra mikrokontroléru, nebo jakoukoliv integrovanou periférii, včetně přiřazení vektorů přerušení [18].



Obr. 5.5 Ukázka projektu vektorové řízení z vývojového prostředí CodeWarrior



Obr. 5.6 Ukázka nastavení modulu PWM v grafickém prostředí QuickStart projektu vektorového řízení

### 5.2.2 Ladící prostředí FREEMASTER

Freemaster nezapomněl ani na kvalitní ladící nástroj umožňující odlaďování programů vytvořených v prostředí CodeWarrior – Freemaster. Tento nástroj umožňuje přes vybrané komunikační rozhraní oboustrannou výměnu dat, tedy přímé čtení nebo zápis do registrů mikrokontroléru. Pro komunikaci bylo zvoleno rozhraní JTAG, které slouží také pro vlastní nahrávání programů do digitálního signálového kontroléru.

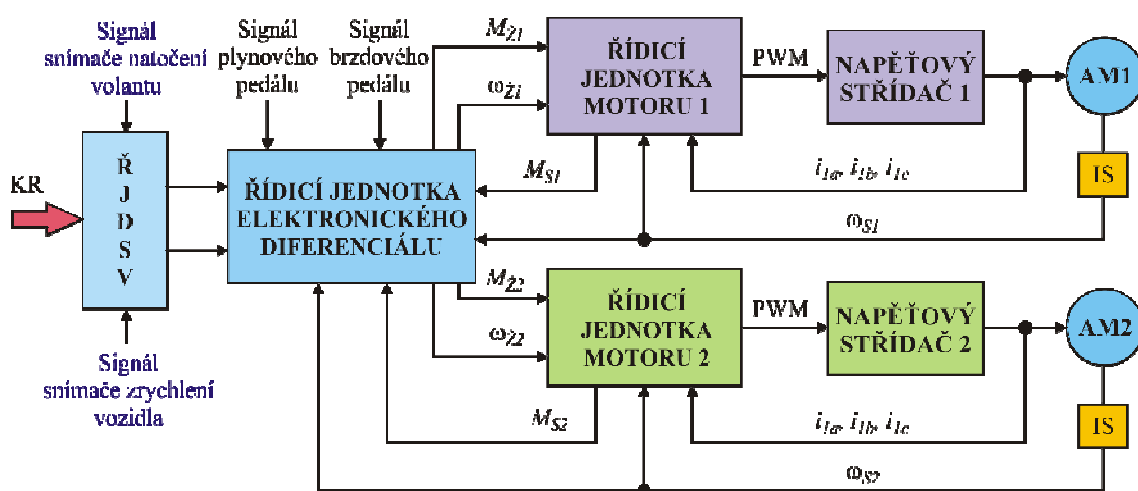
### 5.2.3 Knihovny zapouzdřených funkcí

Freescale vyvinul řadu užitečných knihoven, které jsou volně distribuovány. Tyto knihovny jsou rozděleny dle svého využití na [20] [21] [22] [23]:

- knihovna obecných funkcí
- knihovna všeobecně využitelných digitálních filtrů
- knihovna funkcí pro řízení motorů
- knihovna pokročilých řídicích funkcí

Všechny tyto funkce pracují se zlomkovou aritmetikou.

### 5.3 Implementace funkce elektronického diferenciálu



Obr. 5.7 Experimentální model elektronického diferenciálu

Z Obr. 5.7 je zřejmé, že pro implementaci ED je nutná vzájemná komunikace pohonných jednotek levého (1) a pravého kola (2). Tuto funkci bude vykonávat řídicí jednotka elektronického diferenciálu (ŘJED), která přijímá skutečné hodnoty momentů a otáček motorů z ŘJ1, ŘJ2 a dle algoritmů posílá jednotka zpět nové žádané hodnoty veličin.

ŘJED může být buď samostatná řídicí jednotka, nebo může být realizována jako algoritmus zařazený do kódu v rámci jedné z jednotek. Pro implementaci je použita právě koncepce druhého typu, kdy jedna řídicí jednotka je hlavní a druhá jako podřízená.

Nad ED může být nadřazena řídicí jednotka doplňkových funkcí stabilizace vozidla (ŘJDSV), která ze signálů dalších snímačů (snímač natočení volantu, snímač podélného i příčného zrychlení) může provádět korekci funkce ED.

Komunikační rozhraní (KR) slouží pro napojení na palubní jednotku vozidla.

### 5.3.1 Výměna informací mezi řídicími jednotkami a se sběrnici vozidla

Komunikace musí být prováděna vyšší přenosovou rychlostí, zabezpečením a možností připojením k ostatním prvkům vozidla. Z těchto důvodů byly vybrány:

- *Sběrnice CAN (Controller Area Network) – tato sběrnice slouží pro připojení řídicích jednotek pohonu vozidla na centrální sběrnici napojenou na palubní jednotku vozidla;*
- *rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface) – rozhraní slouží pro vzájemnou komunikaci ŘJ motorů.*

### 5.3.2 Komunikační rozhraní CAN

Standard protokolu CAN pochází od firmy Robert Bosch GmbH. Specifikace protokolu CAN 2.0 [24]:

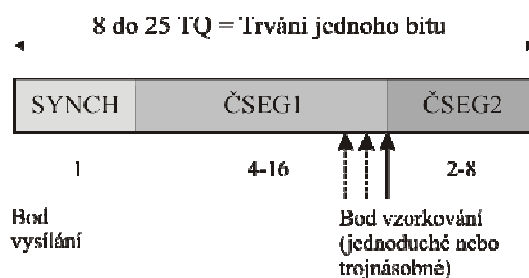
- *široké možnosti nastavení*
- *Multimaster & Multicast*
- *priority zpráv*
- *garantovaná doba zpoždění*
- *detekce a signalizace chyb a automatický opakovaný přenos*

Typické použití je v komplexních systémech nebo v automobilech, kde jsou všechny důležité části systému připojeny k této sběrnici.

Komunikace pomocí sběrnice CAN je realizována s použitím různých typů komunikačních rámců programovatelných délek. Přívlastek multimaster znamená, že pokud na sběrnici není detekován žádný přenos, může jakákoli jednotka okamžitě začít s vysíláním. Integrovaná je i detekce chyb s možností automatického opakovaného přenosu.

Základní časovou jednotkou je Time Quantum (TQ). Jeden bit přenášený touto sběrnici je tvořen třemi částmi [24]:

- *synchronizace – jeden TQ na začátku každého bitu*
- *časový segment 1 (ČSEG1) – 4-16 TQ (kompenzace fázových chyb)*
- *časový segment 2 (ČSEG2) – 2-8 TQ (kompenzace fázových chyb)*



Obr. 5.8 Doba trvání jednoho bitu

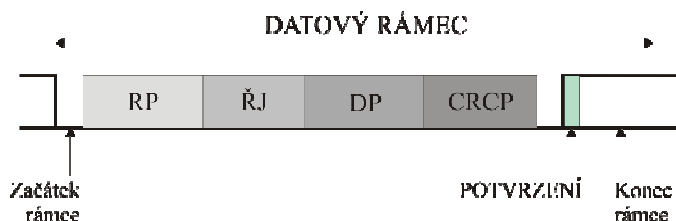
Z Obr. 5.8. je patrná možnost použití jednonásobného nebo trojnásobného vzorkování. Trojnásobné vzorkování nabízí vyšší bezpečnost, protože hodnota jednoho bitu je vždy vzorkována 3krát.

Přenosová rychlost CAN sběrnice je vypočtena dle vzorce 5.2.

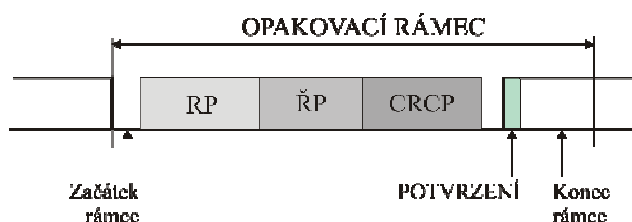
$$P = \frac{f_{TQ}}{TQ_p} \quad [Bd] \quad (5.2)$$

$$f_{TQ} = \frac{f_{CLK}}{P} \quad [Bd] \quad (5.3)$$

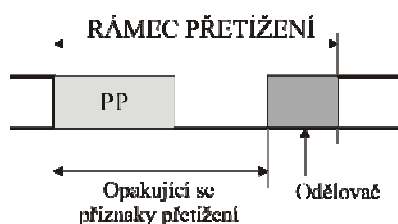
Typy jednotlivých rámců jsou znázorněny dále:



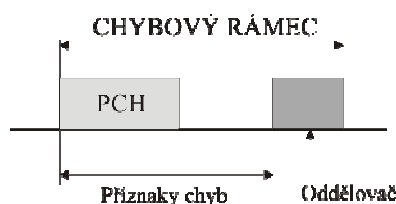
Obr. 5.9. Datový rámec



Obr. 5.10 Rámec pro iniciaci opakovaného přenosu



Obr. 5.11 Rámec přetížení vyžadující zvláštní zpoždění mezi rámci



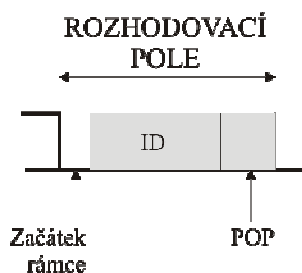
Obr. 5.12. Chybový rámec

Je možno rozlišit až pět typů chyb:

- bitová chyba
- chyba po sobě jdoucích šesti stejných bitů
- chyba CRC
- chyba formátu
- chyba potvrzení

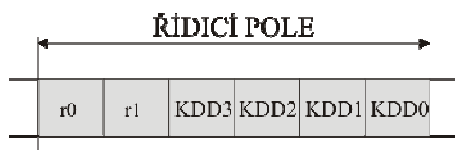
Jednotlivé části datového rámce jsou detailně popsány níže [24].





Obr. 5.13 Rozhodovací pole datového rámce

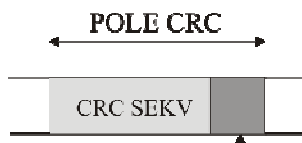
V části ID je uloženo identifikační pole rámce, které jednoznačně definuje příjemce dat.



Obr. 5.14 Řídicí pole datového rámce

První dva bity jsou rezervovány. Bity KDD popisují počet vysílaných datových bajtů. Maximální počet datových bajtů je 8 na jeden datový rámec. Následují samotná data.

Datový rámec je ukončen kontrolním polem, kde je uložena hodnota CRC vypočtená z vysílaných dat.



CRC oddělovač

Obr. 5.15 Pole kontroly CRC

### 5.3.3 Rozhraní SPI

Sériové plně duplexní komunikační rozhraní SPI umožňuje propojení obvodů pomocí čtyř vodičů na krátké vzdálenosti. Koncepce rozhraní typu master-slave jednoznačně vymezuje komunikaci jednotlivých zařízení. Jednotka označená jako master vždy iniciuje přenos dat, slave může vysílat pouze tehdy, vysílá-li i master.

Toto rozhraní je použito pro vzájemnou komunikaci řídicích jednotek pohonu, tedy výměnu okamžitých hodnot veličin důležitých při výpočtu funkce ED a stavových veličin motorů. Mezi tyto veličiny patří:

- skutečné otáčky motoru
- žádané otáčky motoru
- skutečný moment motoru
- žádaný moment motoru
- chybový stav pohonu

Výměna dat mezi jednotkami musí probíhat podle přesně definovaných pravidel. Pro vzájemnou komunikaci dvou ŘJ je vhodné zvolit jednu jednotku jako hlavní (master) a



druhou jako podřízenou (slave). Označení řídicích jednotek bylo zvoleno vzhledem k organizaci komunikace i umístění jednotek ve vozidle následující způsobem:

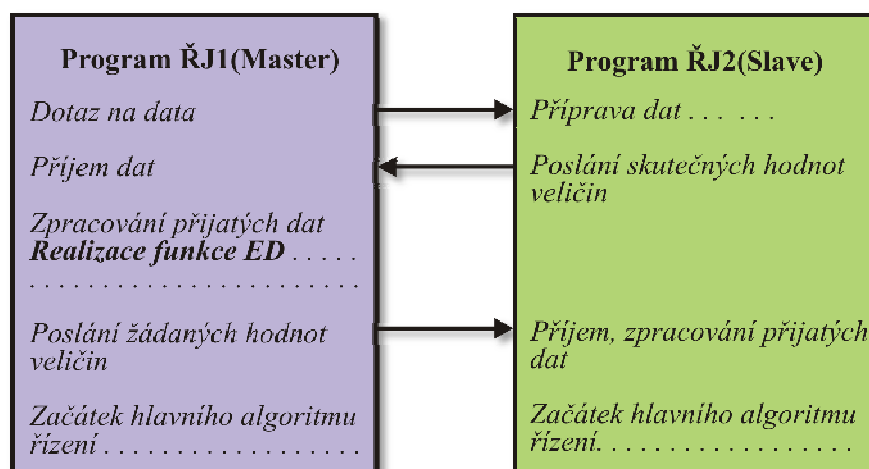
#### Řídicí jednotka 1

- Jednotka ovládající **pravé** přední kolo automobilu (asynchronní motor 1).
- Na rozhraní SPI vybrána jako **master**.

#### Řídicí jednotka 2

- Jednotka ovládající **levé** přední kolo automobilu (asynchronní motor 2).
- Na rozhraní SPI vybrána jako podřízená jednotka **slave**.

Komunikační protokol mezi ŘJ je zobrazen na Obr. 5.16.



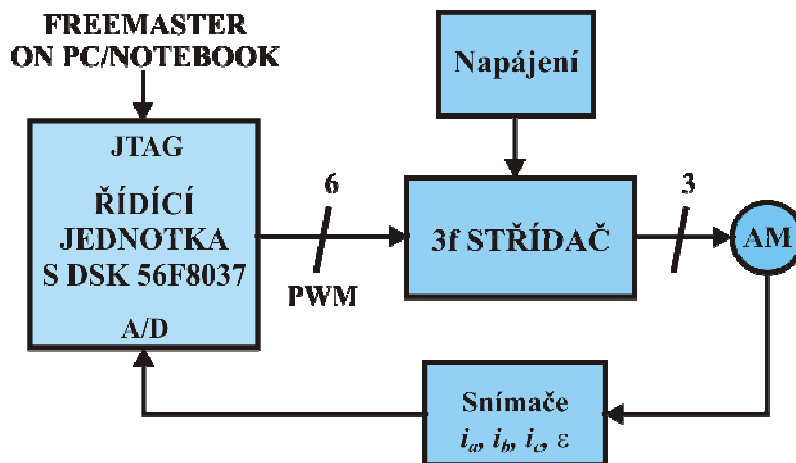
Obr. 5.16 Schéma protokolu výměny dat mezi jednotkami s rozhraním SPI

Jednotka master (ŘJ1) se periodicky dotazuje na nové skutečné hodnoty otáček nebo momentu motoru jednotky slave (ŘJ2) dle aktuální funkce ED probrané v kapitole 3.1.

ŘJ1 po přijetí tato data zpracuje a vytvoří řídicí příkazy, žádané hodnoty otáček, resp. momentu, které pošle zpět jednotce slave. Tato jednotka použije data ve struktuře algoritmu řízení motoru dle požadované funkce ED. Jednotka master musí tedy navíc oproti druhé jednotce provádět výpočty funkce ED.

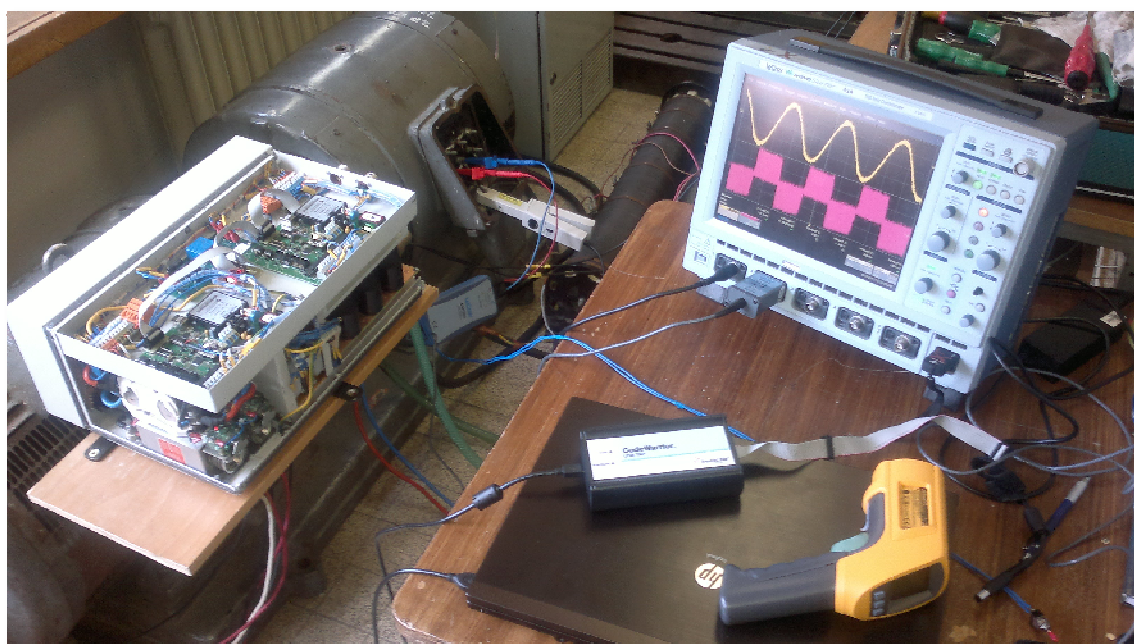
## 6 Experimentální výsledky

### 6.1 Ověření řídicích algoritmů na laboratorním modelu



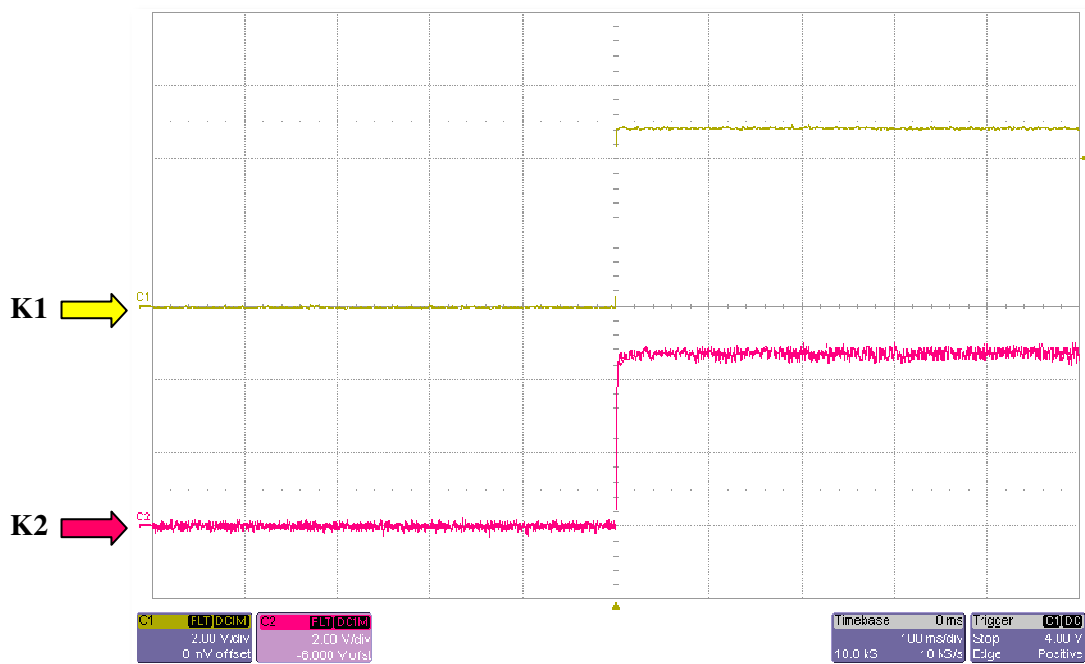
Obr. 6.1 Laboratorní stanoviště pro ověření řídicích algoritmů

Řídicí algoritmy byly ověřeny na laboratorním stanovišti při napájení z třífázového regulačního transformátoru při napětí meziobvodu  $U_{DC} = 330V$ . Byl použit čtyřpólový motor 1LA7130-4AA1 7,5kW se jmenovitým proudem  $I_n = 15,2 A$  a momentem  $M_n = 49,2 Nm$ . Stanoviště bylo zapojeno dle Obr. 6.2.

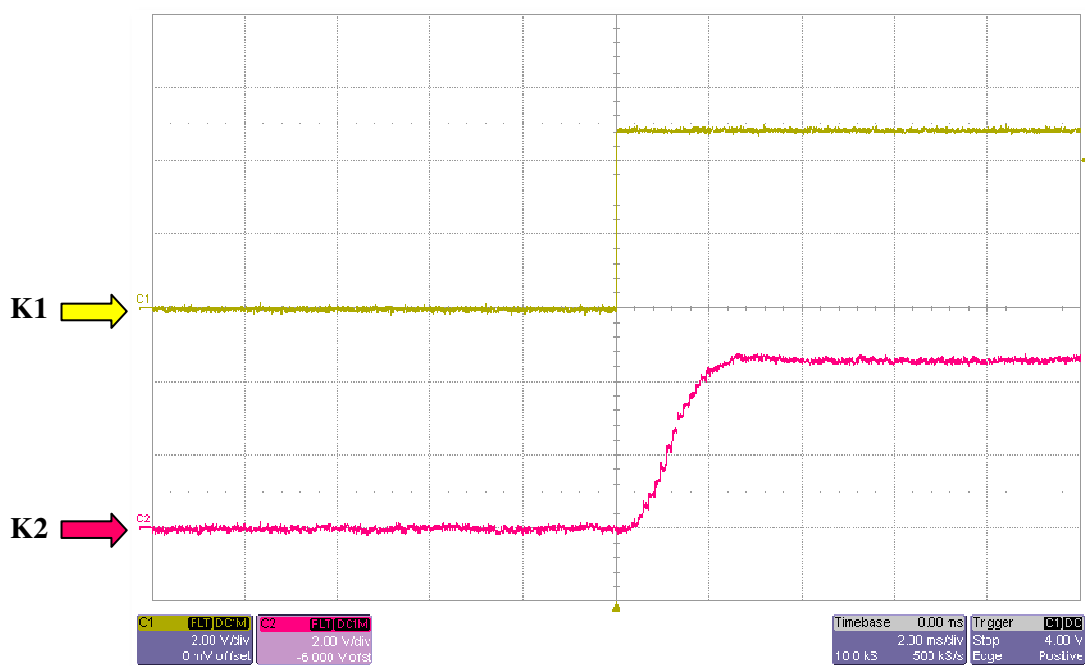


Obr. 6.2 Měřicí stanoviště

## 6.1.1 Vektorového řízení proudová smyčka

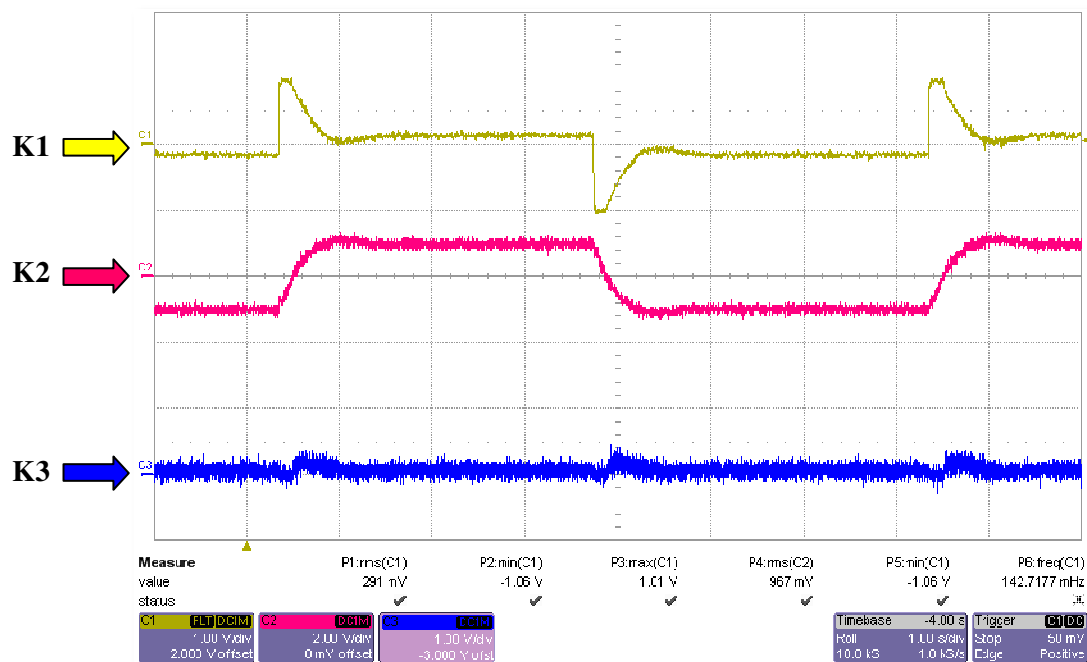


Obr. 6.1 Vektorové řízení – proudová smyčka,  $i_{yž} = 10$  A,  $i_{xž} = 10$  A  
 (K1:  $i_{lyž}=f(t)$  [4 A/d], K2:  $i_{lyS}=f(t)$  [4 A/d],  $t$ : 100 ms/d)



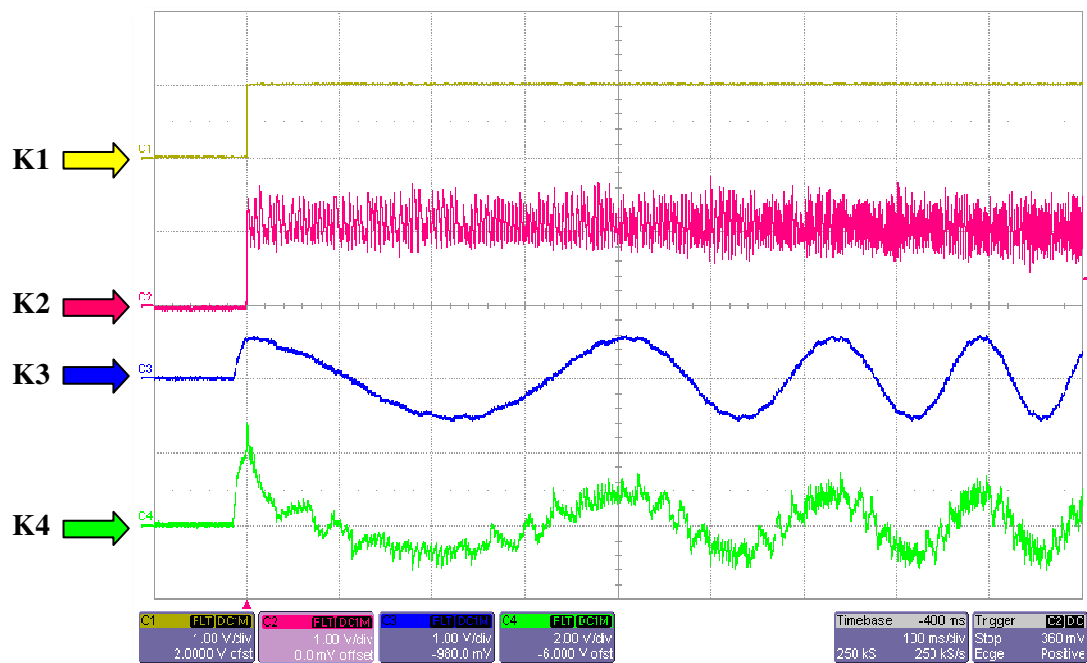
Obr. 6.3 Vektorové řízení (detail) – proudová smyčka,  $i_{yž}=10$  A,  $i_{xž} = 10$  A  
 (K1:  $i_{lyž}=f(t)$  [4 A/d], K2:  $i_{lyS}=f(t)$  [4 A/d],  $t$ : 2 ms/d)

### 6.1.2 Vektorového řízení otáčková smyčka

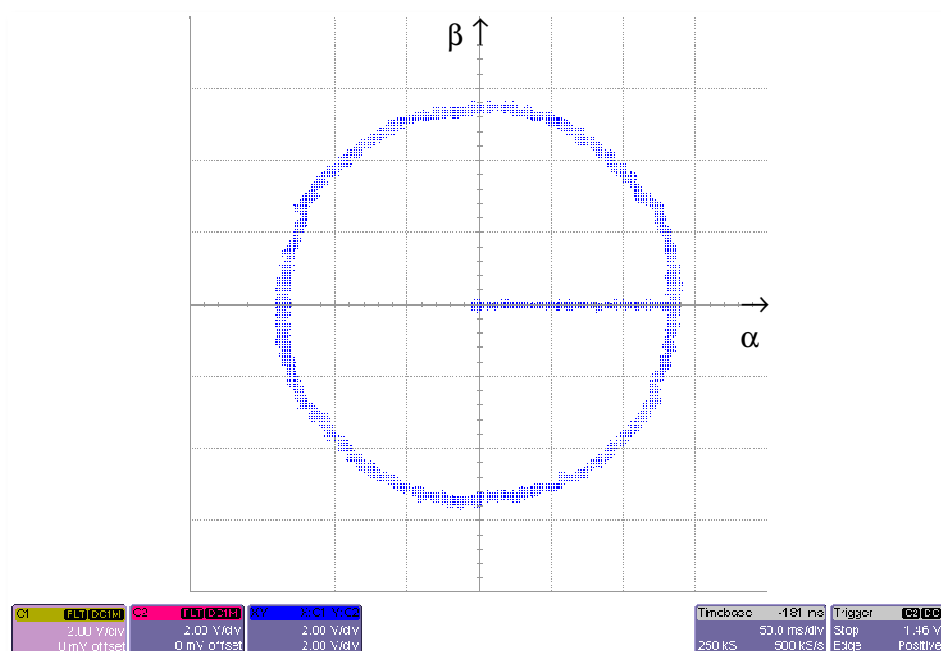


Obr. 6.4 Vektorové řízení – otáčková smyčka a reverzace,  $w_{mž} = 250 \text{ ot.min}^{-1}$ ,  $i_{Lxž} = 10 \text{ A}$   
(K1:  $i_{Lys} = f(t)$  [10 A/d], K2:  $w_{mS} = f(t)$  [750  $\text{ot.min}^{-1}/\text{d}$ ], K3:  $i_{DC} = f(t)$  [10 A/d],  $t$ : 1 s/d)

### 6.1.3 DTC – Takahashiho metoda použití aktivních i nulových vektorů

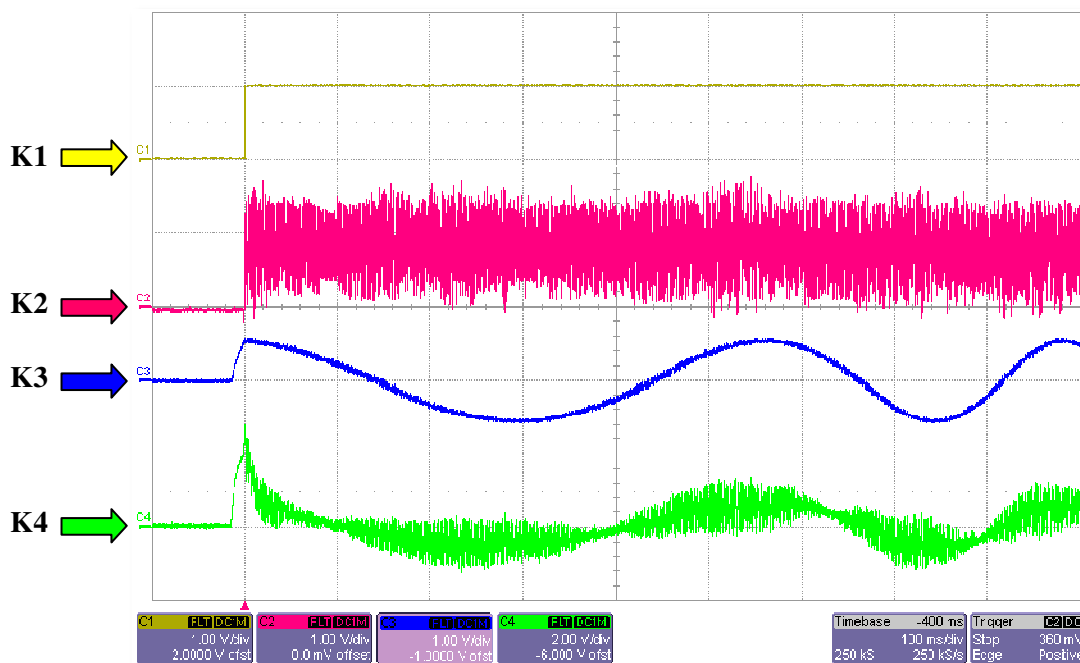


Obr. 6.5 Takahashi DTC aktivní i nulové vektory – průběh spuštění,  $m_z = 10 \text{ Nm}$ ,  $\psi_z = 0,6 \text{ Wb}$   
(K1:  $m_s = f(t)$  [10 Nm/d], K2:  $m_z = f(t)$  [10 Nm/d],  
K3:  $\psi_{1\alpha} = f(t)$  [1 Wb/d], K4:  $i_{1\alpha} = f(t)$  [20 A/d],  $t$ : 100 ms/d)

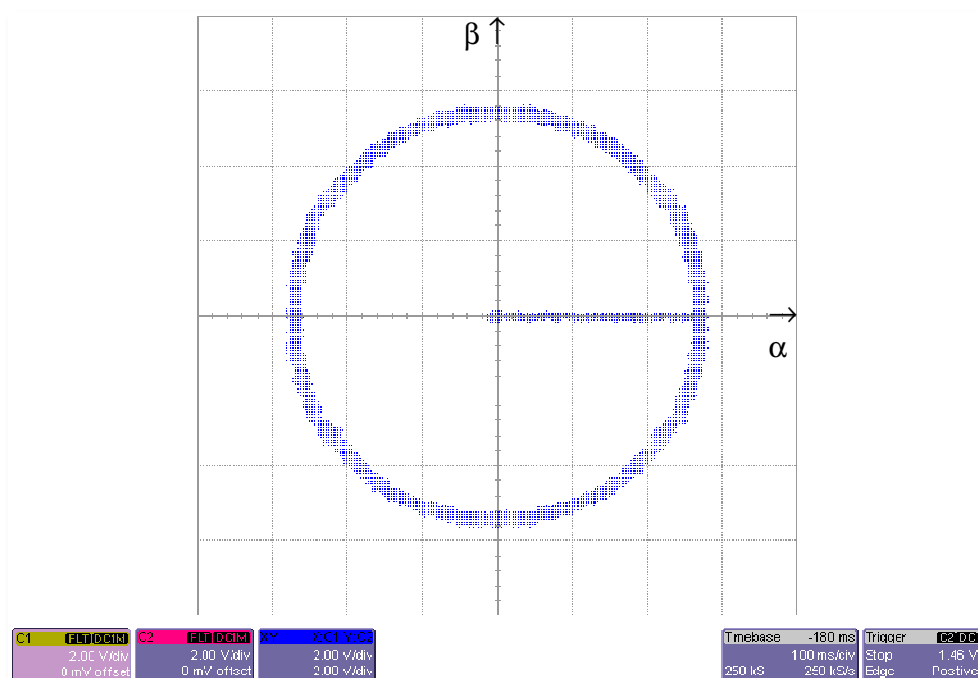


Obr. 6.6 Takahashi DTC aktivní i nulové vektory – trajektorie statorového toku,  $m_z = 10 \text{ Nm}$ ,  $\psi_z = 0,6 \text{ Wb}$  (**K1**:  $\psi_{1\alpha} = f(t)$  [0,25 Wb/d], **K2**:  $\psi_{1\beta} = f(t)$  [0,25 Wb/d],  $t$ : 50 ms/d)

#### 6.1.4 DTC – Takahashiho metoda použití pouze aktivních vektorů



Obr. 6.7 Takahashi DTC aktivní vektory – průběh spuštění,  $m_z = 10 \text{ Nm}$ ,  $\psi_z = 0,6 \text{ Wb}$  (**K1**:  $m_s = f(t)$  [10 Nm/d], **K2**:  $m_z = f(t)$  [10 Nm/d], **K3**:  $\psi_{1\alpha} = f(t)$  [1 Wb/d], **K4**:  $i_{1\alpha} = f(t)$  [20 A/d],  $t$ : 100 ms/d)



Obr. 6.8 DTC Takahashi pouze aktivní vektory – trajektorie statorového toku,  $m_z = 10 \text{ Nm}$ ,  $\psi_z = 0,6 \text{ Wb}$  (**K1**:  $\psi_{1\alpha} = f(t)$  [0,25 Wb/d], **K2**:  $\psi_{1\beta} = f(t)$  [0,25 Wb/d],  $t$ : 100 ms/d)

### 6.1.5 Výměna dat mezi jednotkami s použitím CAN

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.3.1 sběrnice CAN sice bude sloužit pro připojení řídicích jednotek na centrální sběrnici vozidla, ale pro ověření funkce této sběrnice byl vytvořen algoritmus vzájemné výměny dat ŘJ po této sběrnici.

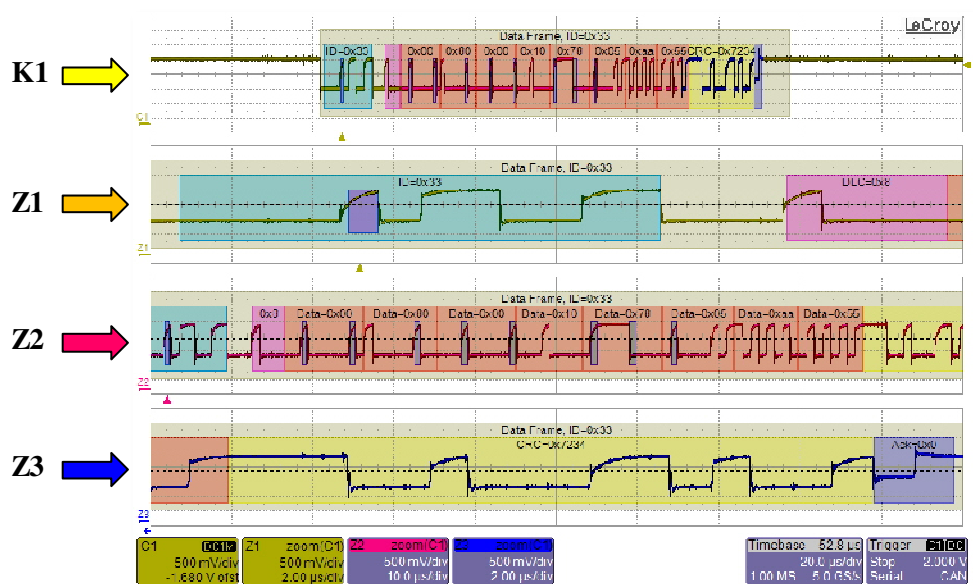
Kde parametry sběrnice byly nastaveny:

- Přenosová rychlost byla nastavena na **1 Mb $\cdot$ s $^{-1}$** ;
- datový rámec je složen z **8 datových bytů**.

Vzájemná výměna dat mezi jednotkami byla provedena při běžícím vektorovém řízení na první jednotce (ŘJ1). Dle testovacího algoritmu jednotka označena jako slave po přijetí požadavku na data připraví a posílá datové bajty zpět jednotce master. Master poté přijatá data vyhodnotí a posílá zpět zpracovaná data.

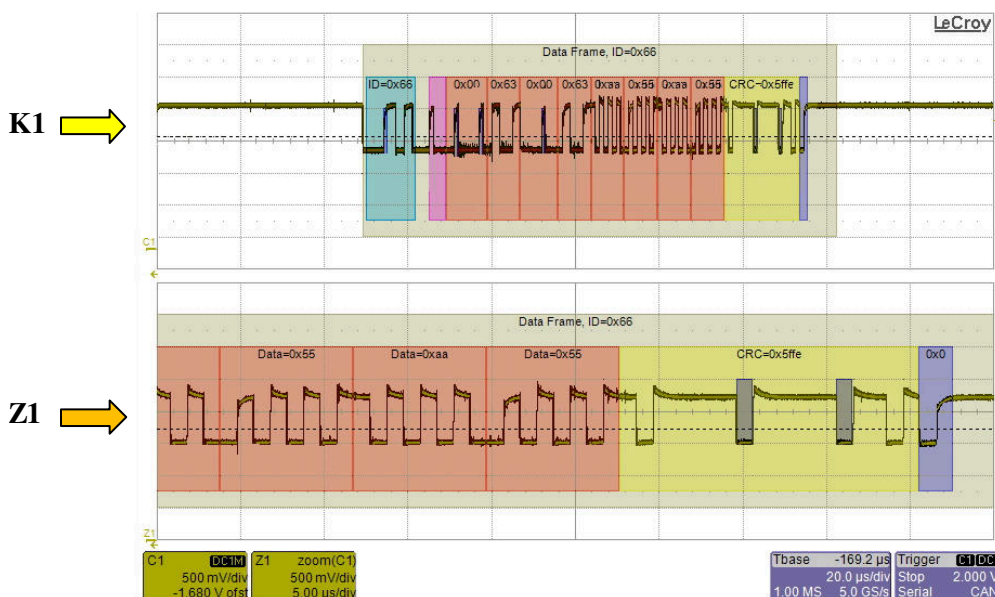
ŘJ2 posílá změřená data s identifikátorem v hexadecimálním kódu 0x33, z naměřeného průběhu na Obr. 6.9. je zřejmé, že data byla potvrzena ŘJ1 – tedy i úspěšně přijata.

ŘJ1 po přijetí hodnot provede vyhodnocení těchto hodnot a následně pošle řídicí příkazy zpět s identifikátorem 0x66. Z Obr. 6.10 lze pozorovat, že data byla potvrzena ŘJ2, a tedy i tentokrát přenos proběhl bez jakýchkoli chyb.



Obr. 6.9 Datový rámec posílaný z jednotky slave (identifikátor 0x33), přenosová rychlost nastavena na 1Mbit.s<sup>-1</sup>

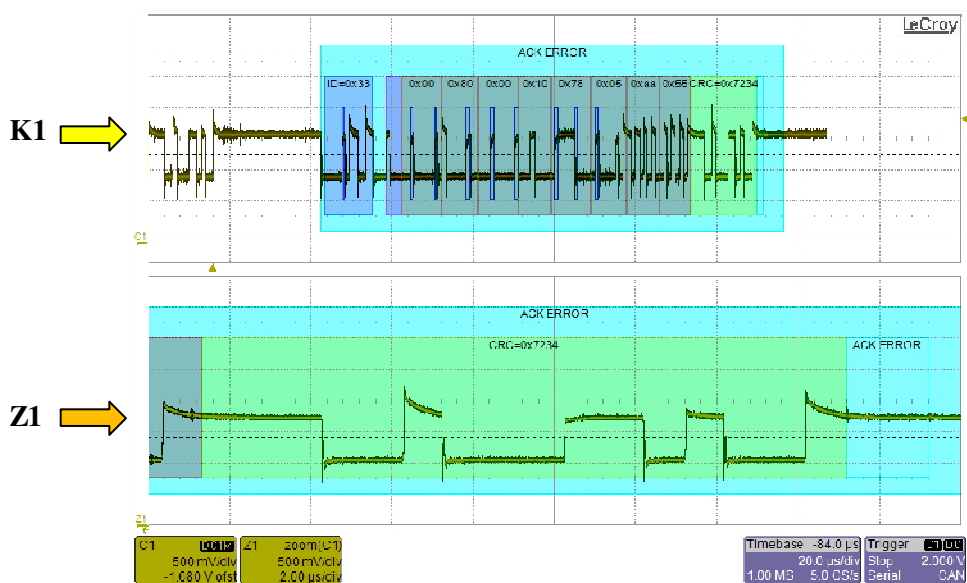
(K1: CANH =  $f(t)$  [0,5 V/d], Z1: identifikační pole rámce, Z2: datový rámec, Z3: pole CRC a potvrzení rámce,  $t$ : 20 µs/d)



Obr. 6.10 Datový rámec vysílán z jednotky master jako odpověď na přijatá data (identifikátor 0x66), přenosová rychlost nastavena na 1Mbit.s<sup>-1</sup>

(K1: CANH =  $f(t)$  [0,5 V/d], Z1: datový rámec, pole CRC a potvrzení rámce,  $t$ : 20 µs/d)

Byl proveden test, kdy byla sběrnice rozpojena, a byl zachycen chybový rámec dle Obr. 6.11. Díky nepřítomnosti RJ2, a tím pádem i nepotvrzení rámce, došlo k chybě přenosu.



Obr. 6.11 Chybový datový rámeček vzniklý nepotvrzením vysílaných, přenosová rychlost nastavena  $1\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$   
(K1: CANH =  $f(t)$  [0,5 V/d], Z1: pole CRC a chyba potvrzení rámce,  $t$ : 20  $\mu\text{s}/d$ )

### 6.1.6 Výměna dat mezi jednotkami s použitím SPI

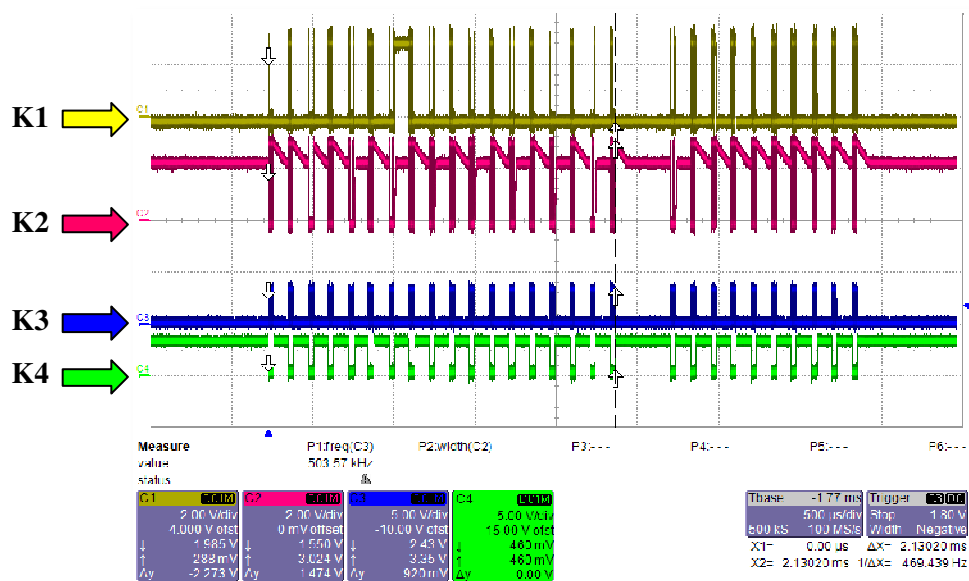
Rozhraní SPI bylo vybráno pro vzájemnou výměnu skutečných a žádaných veličin nutných pro realizace funkcí ED. Řídící jednotky jsou v rámci jednoho šasi vzdáleny 10 cm od sebe, a tudíž použití čtyřvodičového rozhraní SPI s možností použití vyšší komunikační frekvence je bez problému možné.

Pro komunikaci byl vytvořen algoritmus dle navrženého komunikačního protokolu dle kapitoly 5.3.3. Algoritmus výměny dat byl zakomponován do již existujícího algoritmu vektorového řízení AM. Tak byly zajištěny reálné podmínky, za jakých budou jednotky pracovat ve vozidle s elektrickým pohonem. Jednotky byly nastaveny jako: ŘJ1 (master), ŘJ2 (slave).

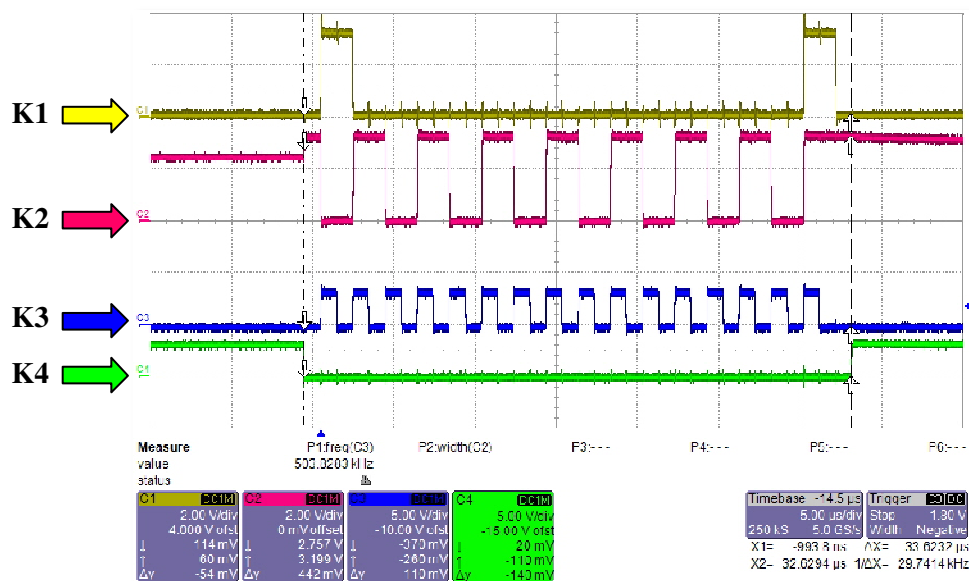
Parametry sběrnice byly nastaveny takto:

- frekvence rozhraní **500 kHz**
- velikost datového slova **16 bitů**

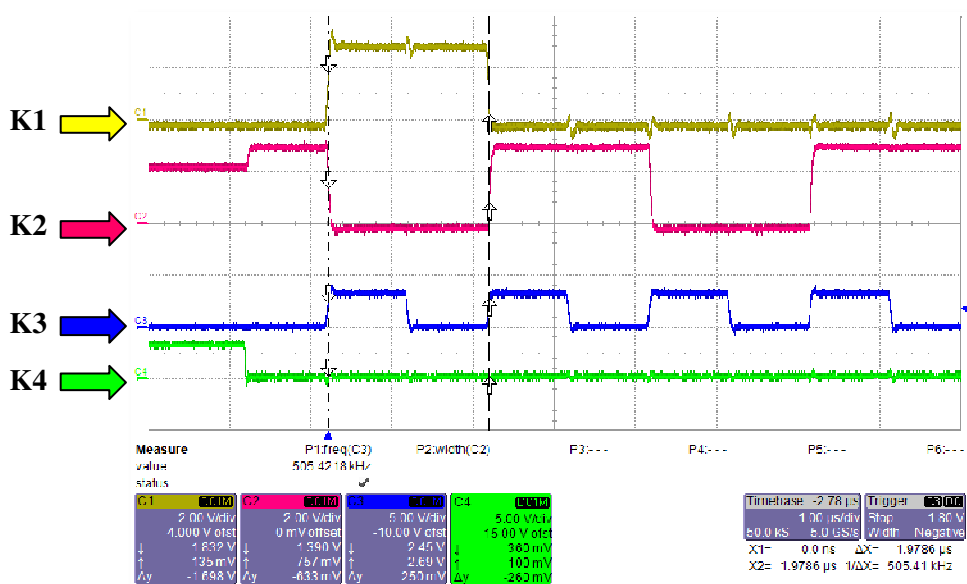




Obr. 6.12 Výměna dat mezi řídicími jednotkami přes rozhraní SPI na frekvenci 500 kHz  
 (K1: MOSI =  $f(t)$  [2 V/d], K2: MOSI =  $f(t)$  [2 V/d],  
 K3: SCLK =  $f(t)$  [5 V/d], K4: SS =  $f(t)$  [5 V/d],  $t$ : 500  $\mu$ s/d)



Obr. 6.13 Jedno datové slovo (16 bitů) zachycené na rozhraní SPI na frekvenci 500 kHz  
 (K1: MOSI =  $f(t)$  [2 V/d], K2: MOSI =  $f(t)$  [2 V/d],  
 K3: SCLK =  $f(t)$  [5 V/d], K4: SS =  $f(t)$  [5 V/d],  $t$ : 5  $\mu$ s/d)



Obr. 6.14 Jeden bit zachycený na rozhraní SPI na frekvenci 500 kHz  
 (K1: MOSI =  $f(t)$  [2 V/d], K2: MOSO =  $f(t)$  [2 V/d],  
 K3: SCLK =  $f(t)$  [5 V/d], K4: SS =  $f(t)$  [5 V/d], t: 5 μs/d)

Jak lze z průběhu na Obr. 6.12, Obr. 6.13, Obr. 6.14 pozorovat přenos dat při frekvenci SCLK = 500 kHz proběhl úspěšně bez jakýchkoli chyb přenosu. Je tedy možno toto rozhraní bez výhrad použít pro komunikaci mezi ŘJ k realizaci funkce elektronického diferenciálu.

## 6.2 Ověření algoritmů elektronického diferenciálu ve vozidle s elektrickým pohonem

Poté co byly ověřeny řídicí algoritmy asynchronního motoru a komunikace přes SPI rozhraní, bylo provedeno ověření funkcí elektronického diferenciálu:

- 1 - elektronický diferenciál
- 2 - uzávěrka ED dle Metody 1
- 3 - uzávěrka ED dle Metody 2
- 4 - protipokluzová funkce

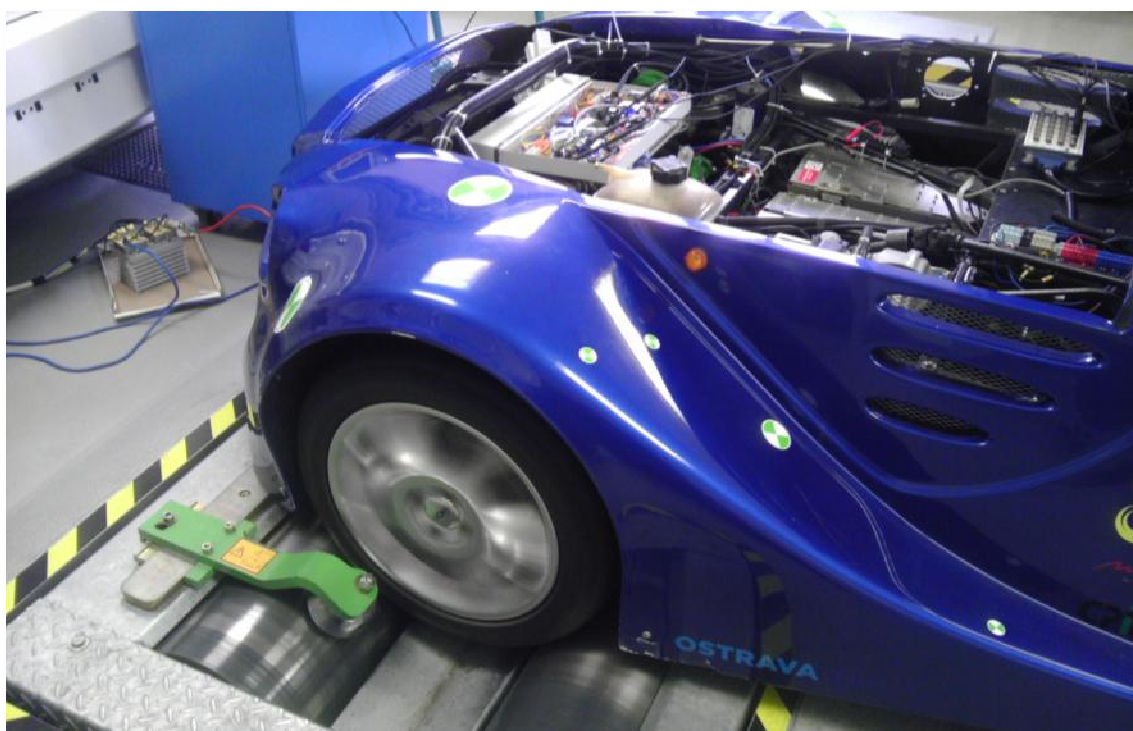
Měření probíhalo nejdříve na válcovém dynamometru v několika režimech a poté na vozovce v různých situacích:

- rozjezd na rovině
- levotočivá zatáčka, pravotočivá zatáčka
- couvání
- rozjezd na rovině s rekuperačním brzděním

Bylo použito vektorové řízení i přímé řízení momentu.



*Obr. 6.15 Detail přední části vozidla s duálním napěťovým střídačem*

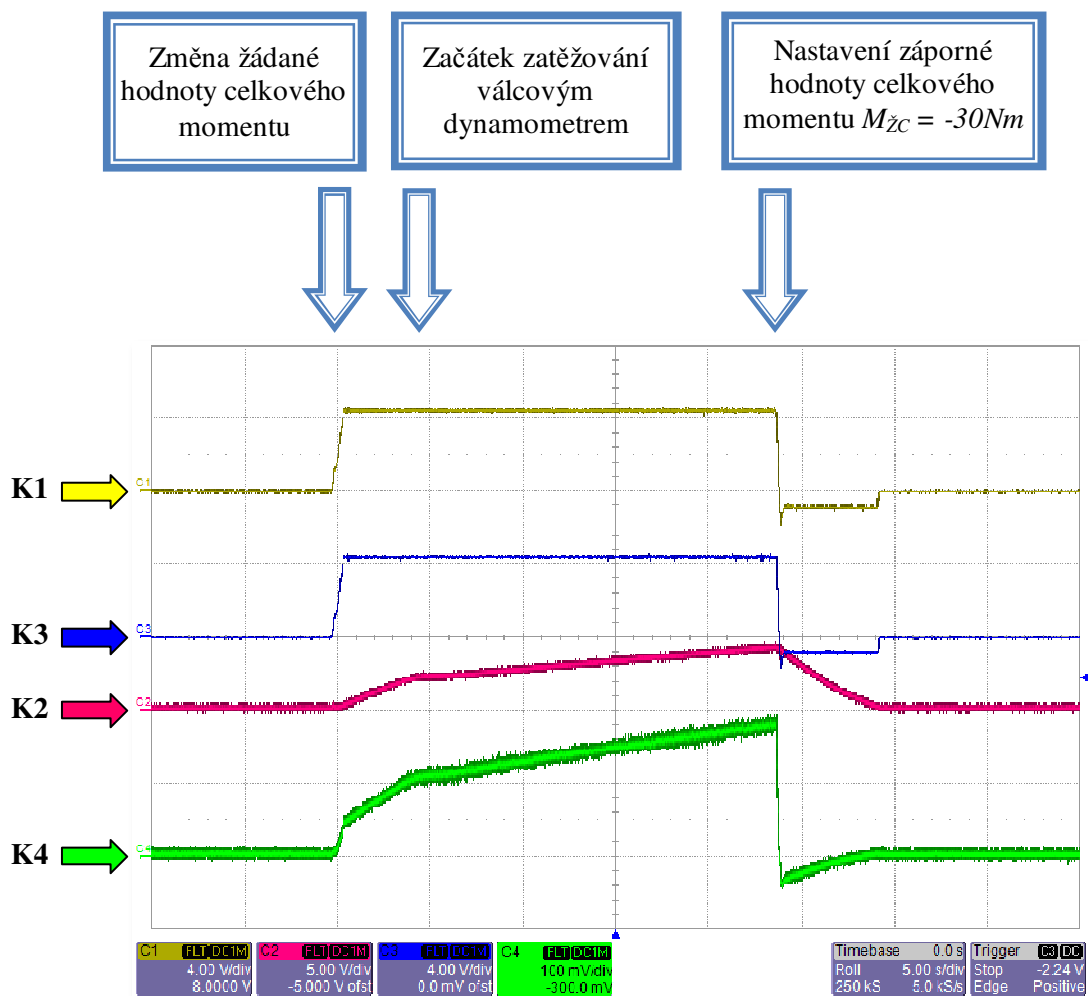


*Obr. 6.16 Testování ED na válcovém dynamometru*

### 6.2.1 ED na válcovém dynamometru – Vektorové řízení

U následujících průběhů byla velikost magnetizační složky nastavena na jmenovitou hodnotu, maximální hodnota celkového žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$ . Napájení bylo řešeno z akumulátorové baterie vozidla o jmenovitém napětí 320 V.

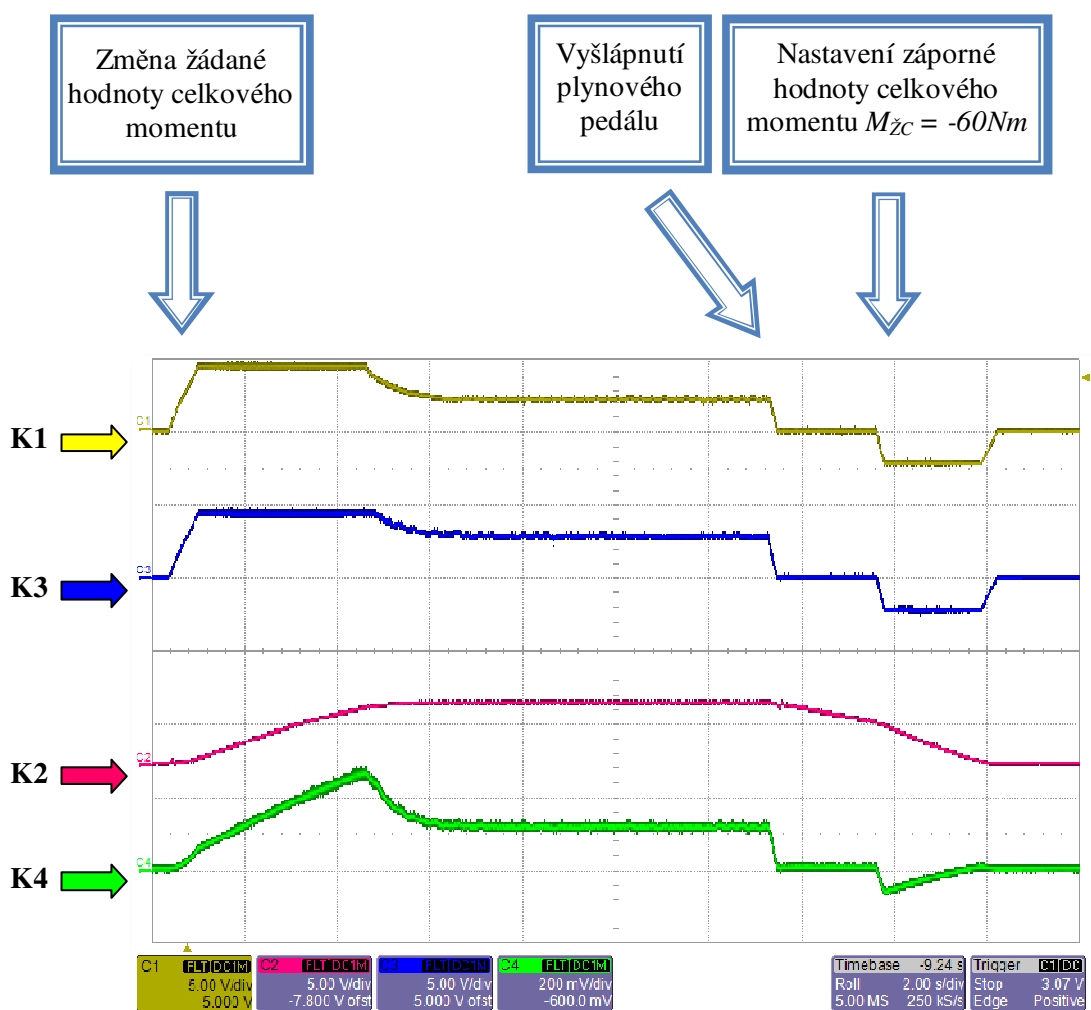
#### 6.2.1.1 Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním



Obr. 6.17 Rozjezd s ED na válcovém dynamometru se zatížením s rekuperací,  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$   
 (K1:  $M_{S1} = f(t)$  [55 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [2000 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
 K3:  $M_{S2} = f(t)$  [55 Nm /d], K4:  $i_{DC} = f(t)$  [10 A/d],  $t$ : 5 s/d)

V této situaci je opět celková hodnota žádaného momentu rovnoměrně rozdělena na oba motory. Diferenciál pracuje bezchybně.

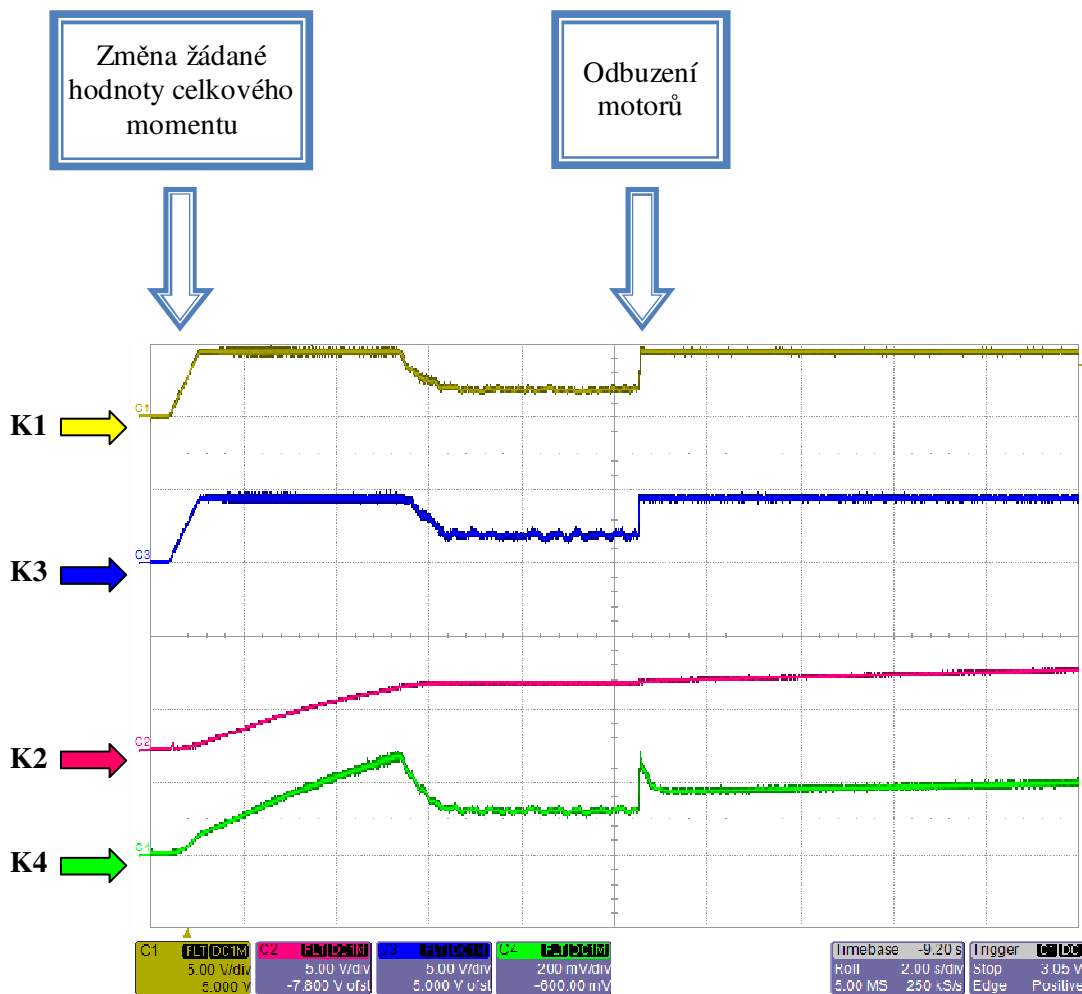
Při vyšlápnutí plynového pedálu je nastavená záporná hodnota momentu  $M_{\Sigma C} = -30 \text{ Nm}$ , na průběhu proudu v meziobvod (K4) je pozorovatelný záporný proud tekoucí do akumulátorové baterie i znatelné snížení otáček motoru 1 vlivem rekuperačního brzdění.



Obr. 6.18 Rozjezd s ED na válcovém dynamometru bez zatížení s rekuperací,  $M_{zC} = 120 \text{ Nm}$   
 (K1:  $M_{S1} = f(t)$  [70 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [2000 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
 K3:  $M_{S2} = f(t)$  [70 Nm /d], K4:  $i_{DC} = f(t)$  [20 A/d],  $t: 2 \text{ s/d}$ )

U tohoto ověření bylo vypnuto zatěžování válcovým dynamometrem, a jak lze pozorovat, motory se rozběhly do maximálních otáček, poté byl v čase  $t = 13,5 \text{ s}$  vyšlápnut plynový pedál. Následně byla nastavena záporná hodnoty celkového žádaného momentu  $M_{zC} = -60 \text{ Nm}$ , na průběhu proudu v meziobvod (K4) je pozorovatelný jak záporný proud tekoucí do akumulátorové baterie, tak i znatelné snížení otáček motoru 1 vlivem rekuperačního brzdění.

## 6.2.1.2 Rozjezd s ED a následné odbuzení motorů



Obr. 6.19 Rozjezd s ED na válcovém dynamometru bez zatížení s následným odbuzením motorů,  
 $M_{ZC} = 120 \text{ Nm}$  (**K1**:  $M_{S1} = f(t)$  [70 Nm/d], **K2**:  $n_{S1} = f(t)$  [2000 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
**K3**:  $M_{S2} = f(t)$  [70 Nm /d], **K4**:  $i_{DC} = f(t)$  [20 A/d],  $t$ : 2 s/d)

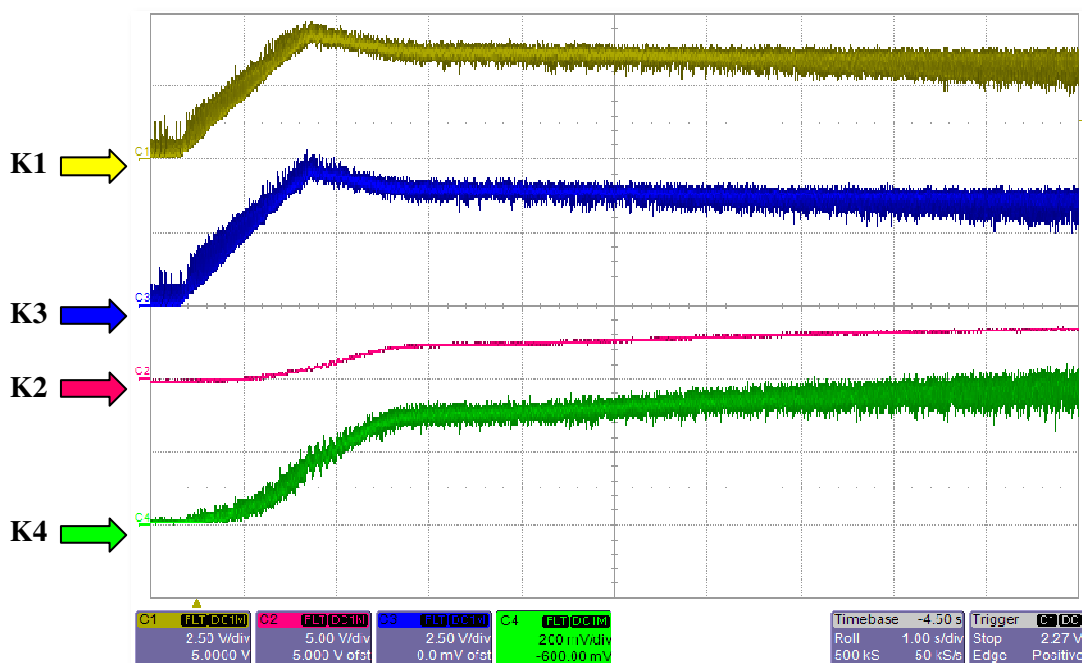
Jako závěrečné měření ED s vektorovým řízením byl proveden rozjezd vozidla na válcovém dynamometru bez zatížení s následným odbuzením motorů. Jakmile je dosaženo maximálních otáček motorů, jsou motory v čase  $t = 10,3 \text{ s}$  odbuzeny. Po odbuzení dochází k okamžitému zvýšení momentů motorů a k dalšímu zvyšování jejich otáček.

Toto je pouze modelová situace, při normálním provozu by k odbuzení muselo dojít již dříve a to tehdy začínají-li klesat momenty motorů.

### 6.2.2 ED na válcovém dynamometru – DTC

U měření DTC byla žádaná hodnota statorového toku nastavena na jmenovitou hodnotu, maximální hodnota celkového žádaného momentu byla nastavena na  $100 \text{ Nm}$ . Strmost nárůstu žádaného momentu byla omezena rampou. Hystereze hysterezních regulátorů byly nastaveny na nulovou hodnotu. Byla použita Takahashiho metoda, kdy jsou spínány aktivní a nulové vektory. Napájení bylo řešeno z akumulátorové baterie vozidla o jmenovitém napětí  $320 \text{ V}$ .

#### 6.2.2.1 Rozjezd s ED



Obr. 6.20 Rozjezd s ED na válcovém dynamometru se zatížením,  
 $M_{\Sigma C} = 100 \text{ Nm}$ , (**K1**:  $M_{S1} = f(t)$  [ $30 \text{ Nm/d}$ ], **K2**:  $M_{S2} = f(t)$  [ $30 \text{ Nm/d}$ ],  
**K3**:  $n_{S1} = f(t)$  [ $2000 \text{ ot.min}^{-1}/\text{d}$ ], **K4**:  $i_{DC} = f(t)$  [ $20 \text{ A/d}$ ],  $t$ :  $1 \text{ s/d}$ )

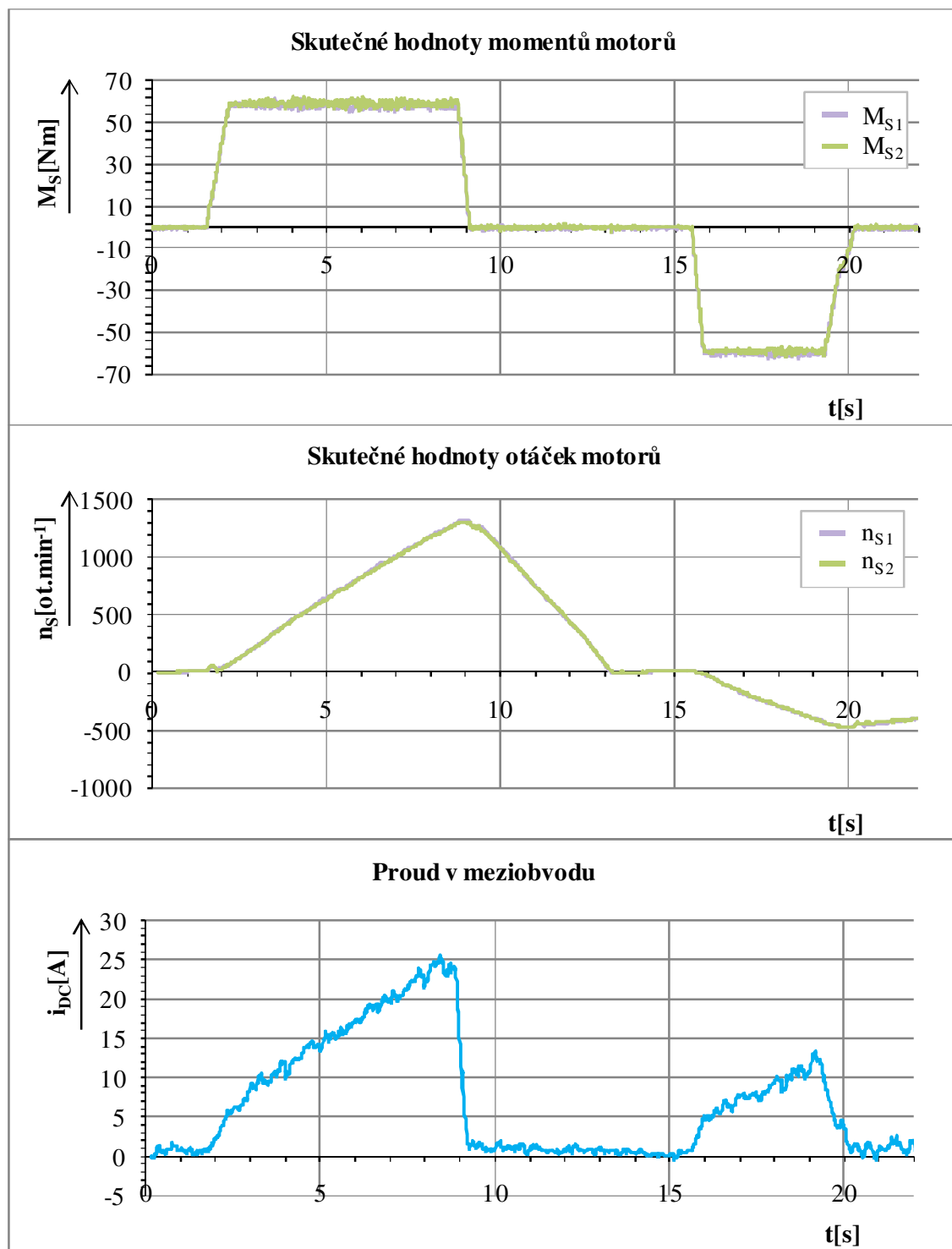
Je patrné, že ED s přímým řízením momentu dle Takahashiho metody funguje také bezchybně. Lze pozorovat, že tato metoda řízení asynchronního stroje vykazuje velký rozkmit momentu.

### 6.2.3 ED na vozovce – Vektorové řízení

V následujících průbězích index 1 označuje pravé kolo spjaté s motorem 1 (fialová barva), index 2 označuje levé kolo vozidla (zelená barva). Následující průběhy již nemohly být zachyceny laboratorním osciloskopem, a proto byla použita měřicí karta NI DAQCARD-6024E ve spojení s notebookem. Výsledky byly poté vneseny do grafů.

Maximální hodnota celkové hodnoty žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$ . Napájení bylo řešeno z akumulátorové baterie vozidla o jmenovitém napětí  $320 \text{ V}$ .

## 6.2.3.1 Rozjezd s ED a následné couvání



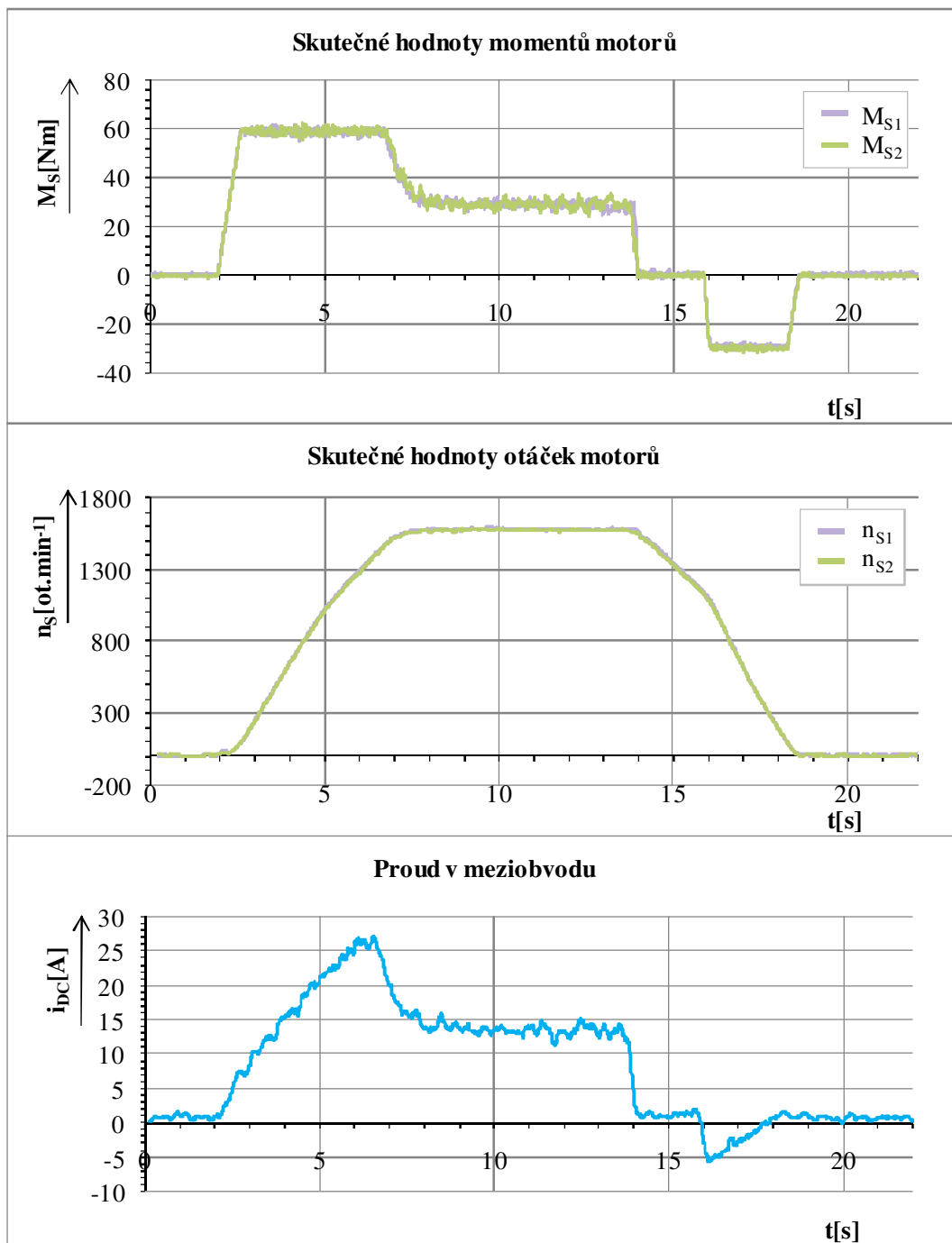
Obr. 6.21 Vektorové řízení s ED – rozjezd a couvání

Na těchto průbězích je zobrazen rozjezd vozidla s ED realizovaným pomocí vektorového řízení, kde maximální hodnota celkového žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$  a strmost nárůstu byla omezena rampou. V čase  $t = 2 \text{ s}$  dochází k rozjezdu vozidla a otáčky



obou motorů stoupají. K vyšlápnutí plynového pedálu dochází v čase  $t = 8,8$  s a otáčky poté klesají, vozidlo je brzděno mechanickými brzdami. Dále v čase  $t = 14$  s dochází k přepnutí algoritmu, a tedy k následnému couvání vozidla.

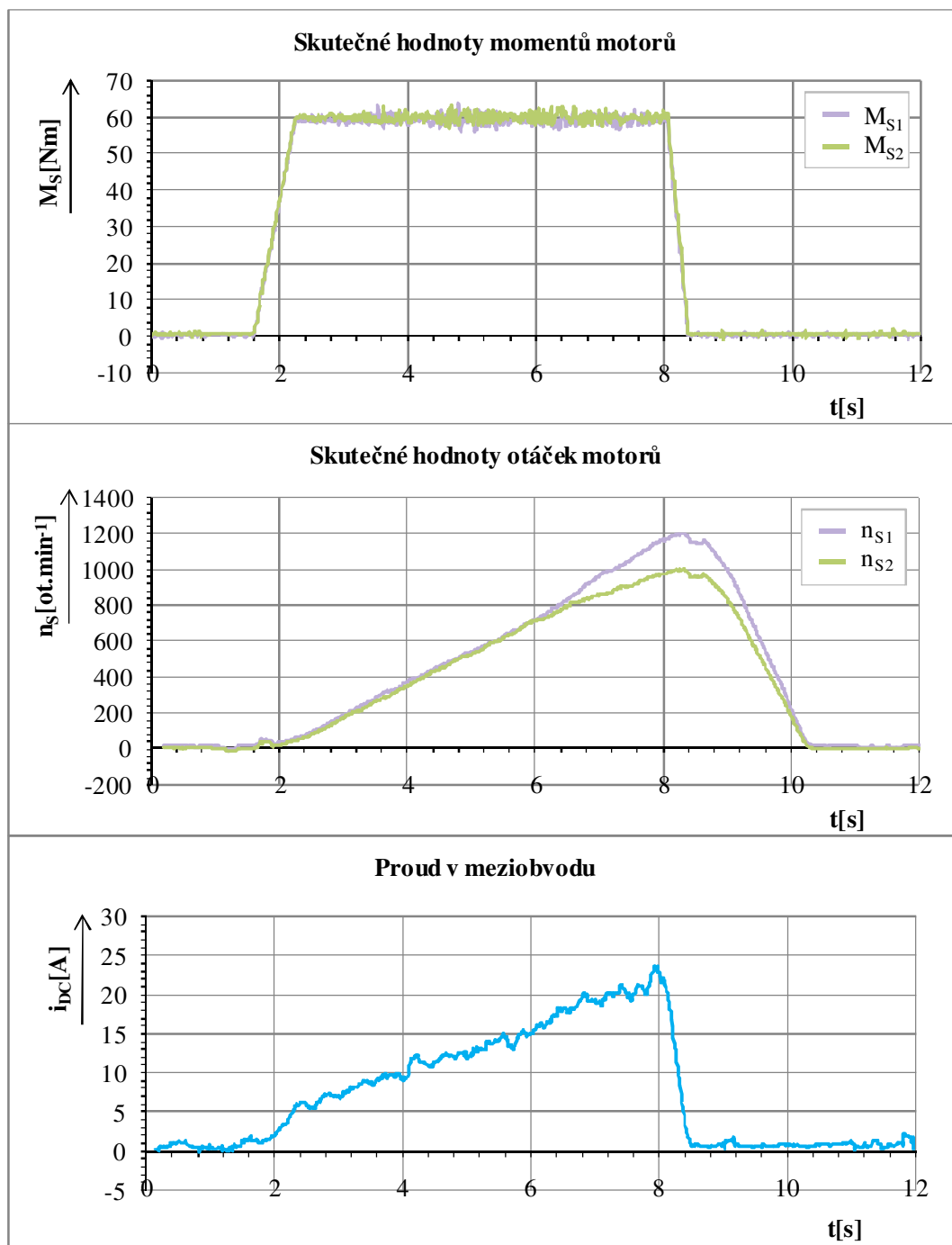
### 6.2.3.2 Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním



Obr. 6.22 Vektorové řízení s ED – rozjezd a rekuperační brzdění

Zde je zachycen rozjezd vozidla, v čase  $t = 13,8$  s vyšlápnut plynový pedál a v čase  $t = 16$  s je aktivováno rekuperační brzdění  $M_{zc} = -60$  Nm. Jak lze pozorovat po aktivaci brzdění, otáčky klesají strměji a do akumulátorové baterie teče proud z měniče.

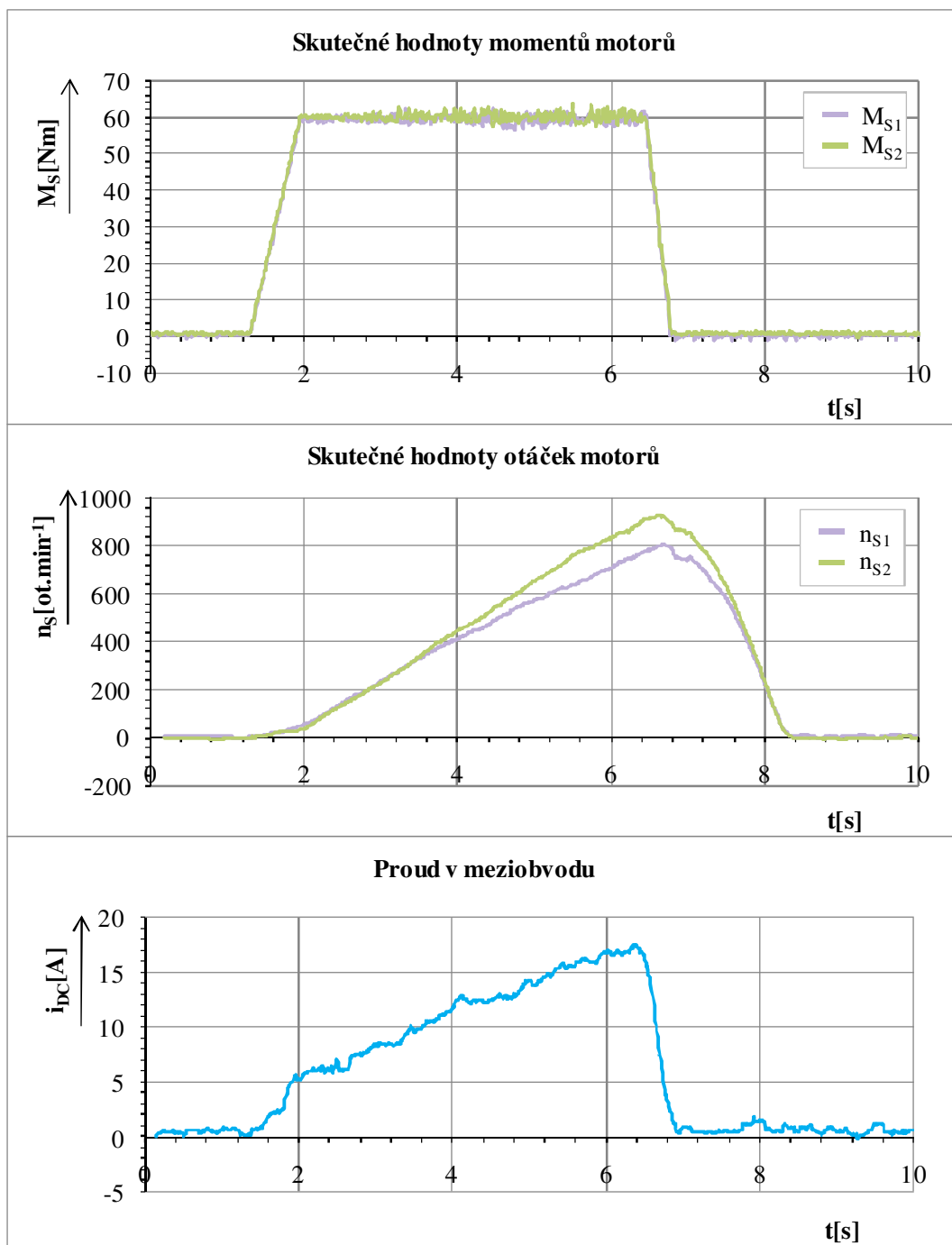
## 6.2.3.3 Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky



Obr. 6.23 Vektorové řízení s ED – rozjezd a levotočivá zatáčka

Vozidlo se rozjíždí na rovném úseku vozovky a následně vjíždí do levotočivé zatáčky. Levé vnitřní kolo (s indexem 2) má nižší otáčky než vnější kolo. Zákmit v průběhu otáček při rozjezdu (v čase  $t = 1,6$  s) a při vyšlápnutí plynového pedálu je způsoben vůlí v převodové skříní vozidla.

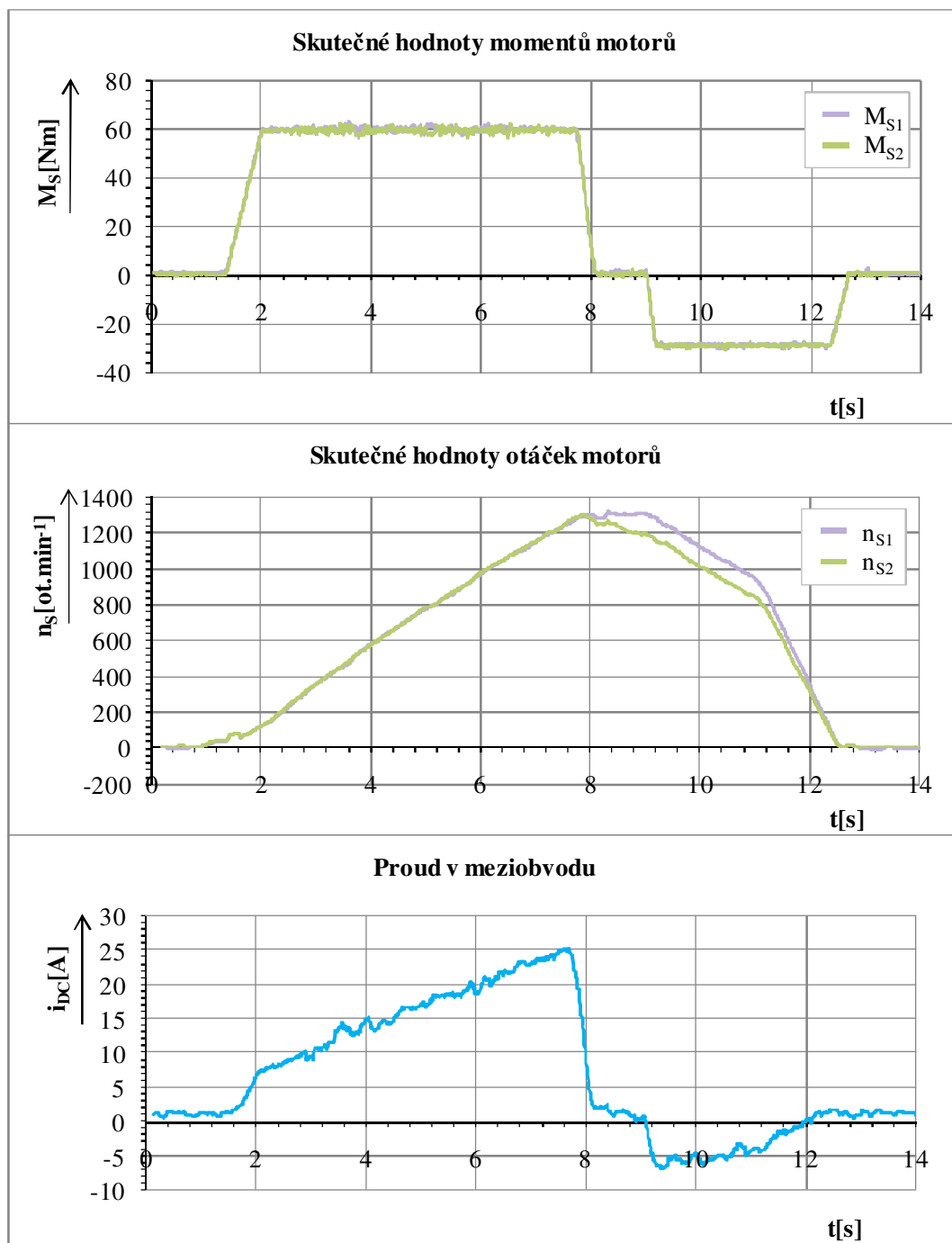
## 6.2.3.4 Rozjezd s ED do pravotočivé zatáčky



Obr. 6.24 Vektorové řízení s ED – rozjezd a pravotočivá zatáčka

Vozidlo se rozjíždí na rovném úseku vozovky a následně vjíždí do pravotočivé zatáčky. Pravé vnitřní kolo (s indexem 1) má nižší otáčky než vnější kolo.

## 6.2.3.5 Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky s rekuperačním brzděním



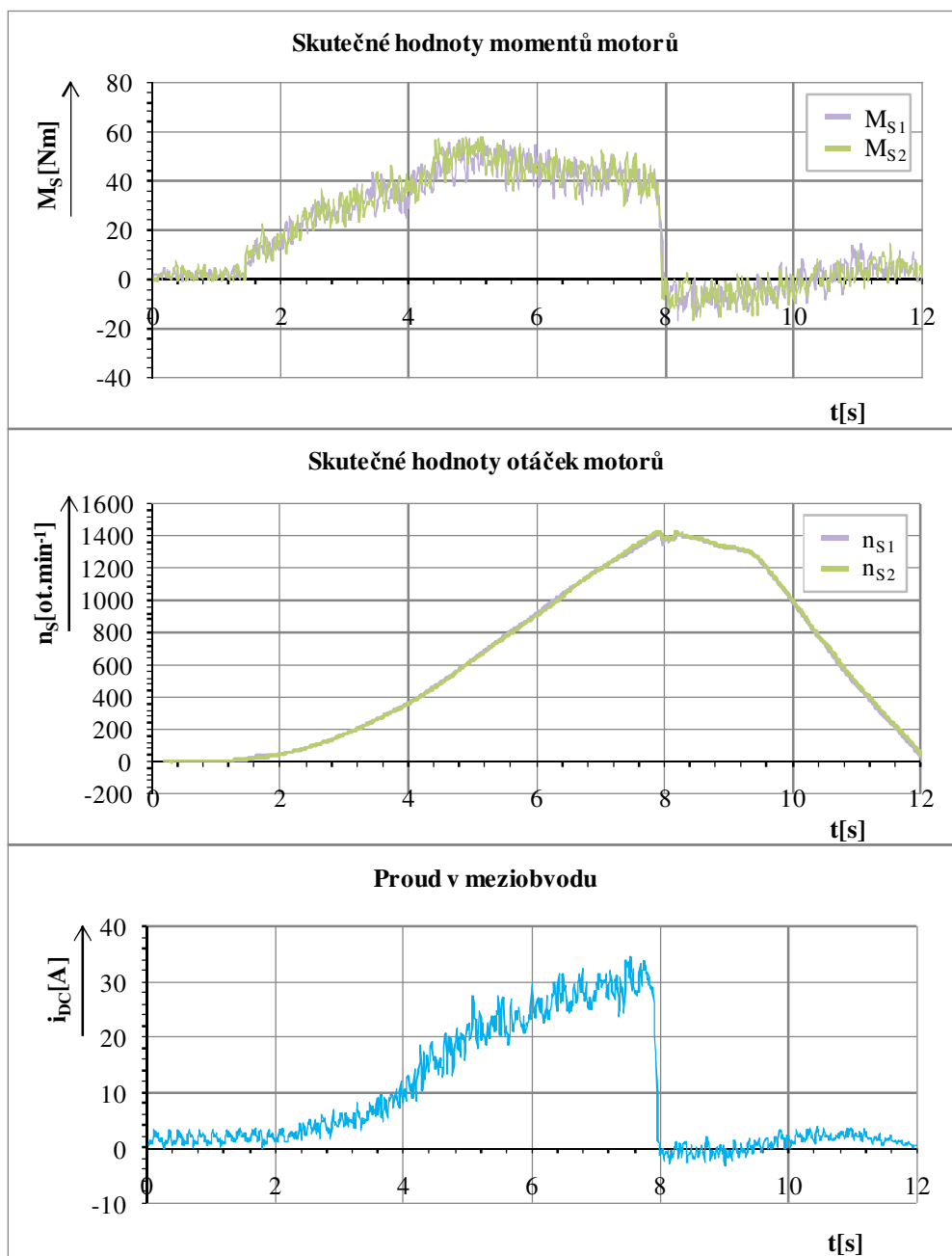
Obr. 6.25 Vektorové řízení s ED – rozjezd a levotočivá zatáčka s rekuperačním brzděním

Na závěr bylo otestováno rekuperační brzdění při průjezdu zatáčkou. Vozidlo vjelo do zatáčky a v jedné čtvrtině zatáčky ( $t = 9$  s) bylo aktivováno rekuperační brzdění. V čase  $t = 11,25$  s byly ve vozidle aktivovány i mechanické brzdy.

### 6.2.4 ED na vozovce – DTC

V následujících průbězích index 1 označuje pravé kolo spjaté s řídicí jednotkou 1 (fialová barva), index 2 označuje levé kolo vozidla (zelená barva). Maximální hodnota celkové hodnoty žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\text{žc}} = 100 \text{ Nm}$ . Žádaná hodnota byla nastavována plynovým pedálem.

#### 6.2.4.1 Rozjezd s ED

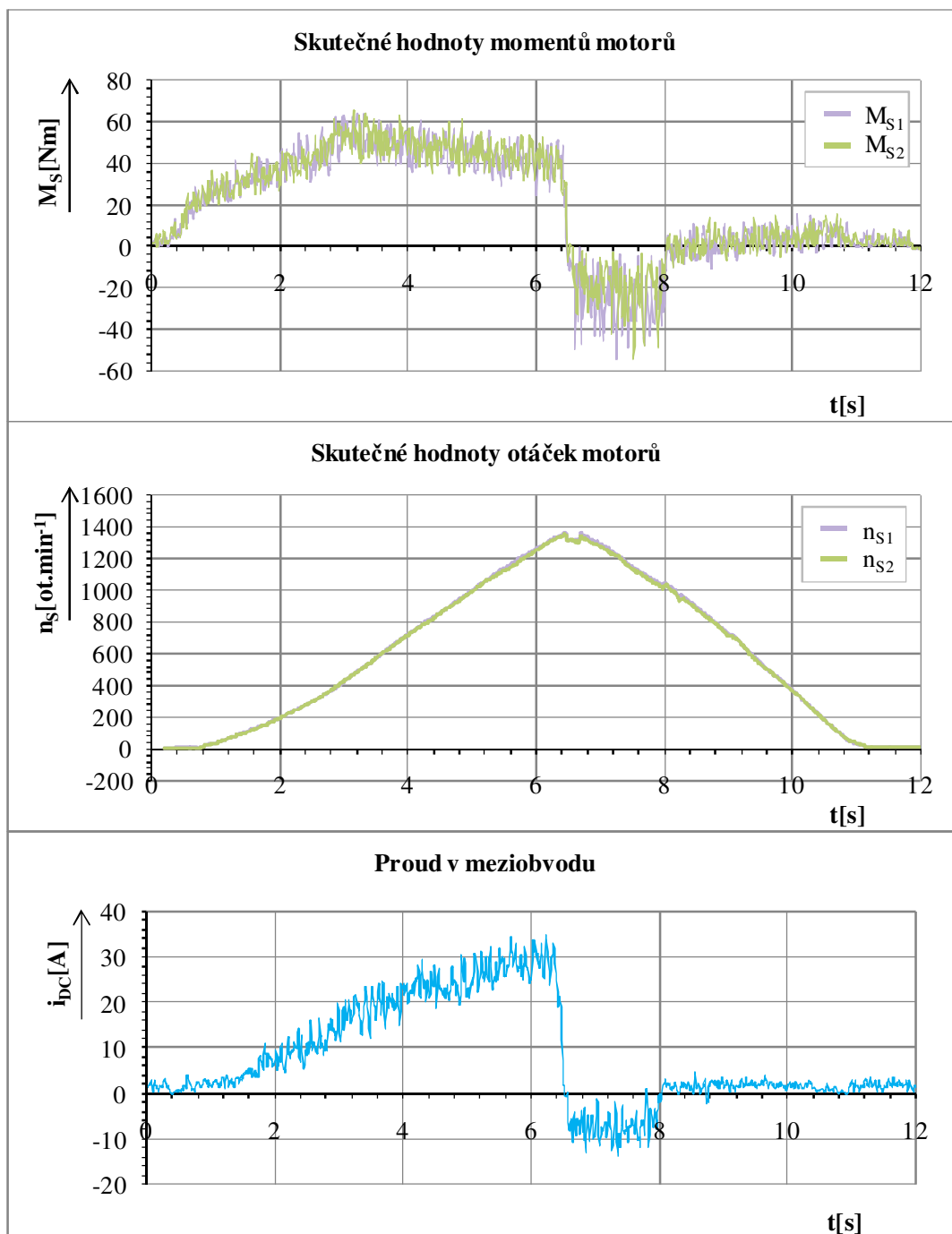


Obr. 6.26 DTC s ED – rozjezd

Na těchto průbězích je zobrazen rozjezd vozidla s ED realizovaný pomocí přímého řízení momentu s využitím aktivních i nulových vektorů, kde maximální hodnota celkového žádaného

momentu byla nastavena na  $M_{\text{žc}} = 100 \text{ Nm}$  a strmost nárůstu byla omezena rampou. V čase  $t = 1,5 \text{ s}$  dochází k rozjezdu vozidla a otáčky obou motorů stoupají. K vyšlápnutí plynového pedálu dochází v čase  $t = 7,7 \text{ s}$  a otáčky poté klesají, vozidlo je v čase  $t = 11,4 \text{ s}$  brzděno mechanickými brzdami.

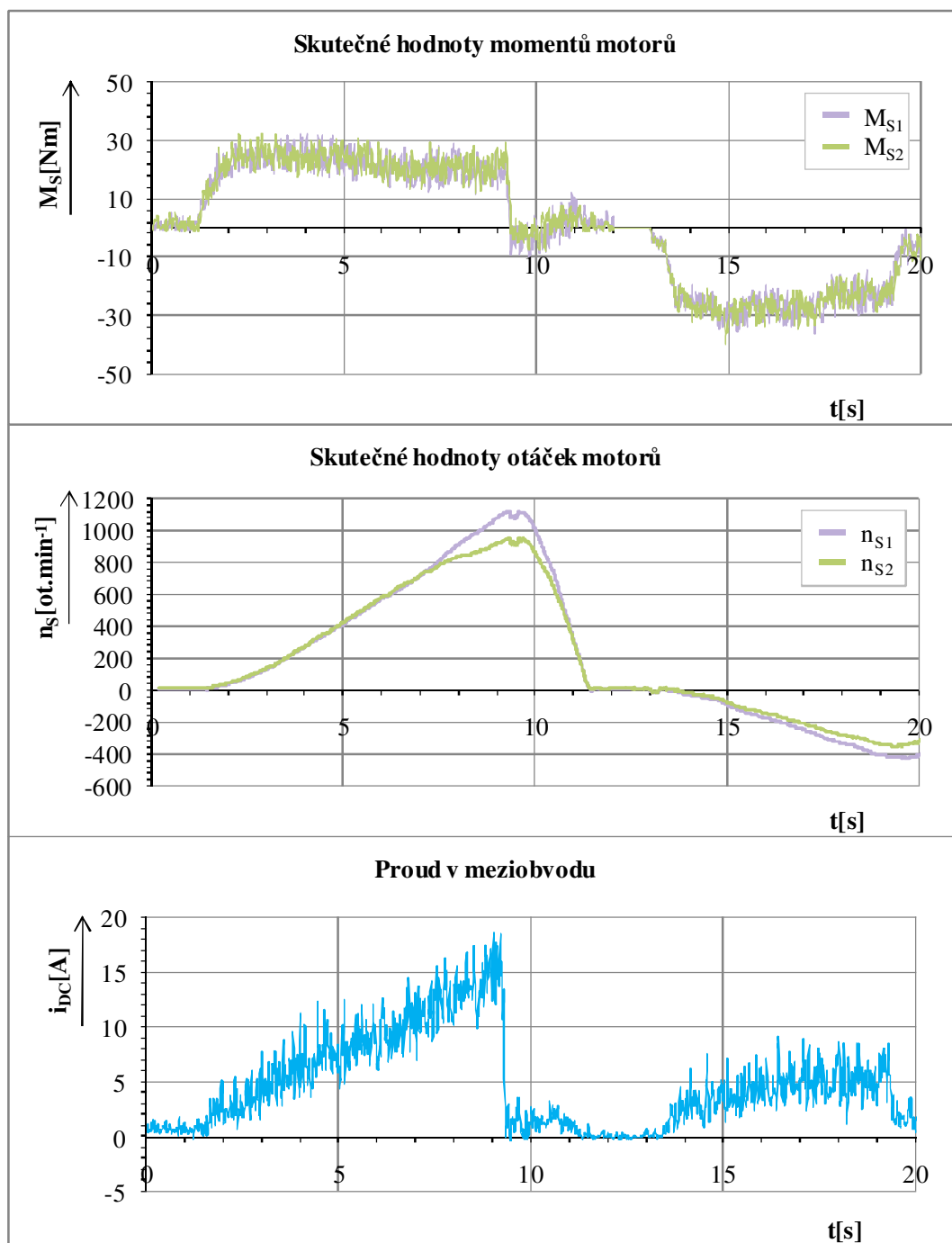
#### 6.2.4.2 Rozjezd s ED a následným rekuperačním brzděním



Obr. 6.27 DTC s ED – rozjezd a rekuperační brzdění

Zde je zachycen rozjezd vozidla, v čase  $t = 6,4 \text{ s}$  je vyšlápnut plynový pedál a okamžitě je aktivováno rekuperační brzdění  $M_{ZC} = -40 \text{ Nm}$  (spínání pouze aktivních vektorů). Jak lze pozorovat po aktivaci brzdění do akumulátorové baterie teče proud z měniče.

#### 6.2.4.3 Rozjezd s ED do levotočivé zatáčky a následné couvání

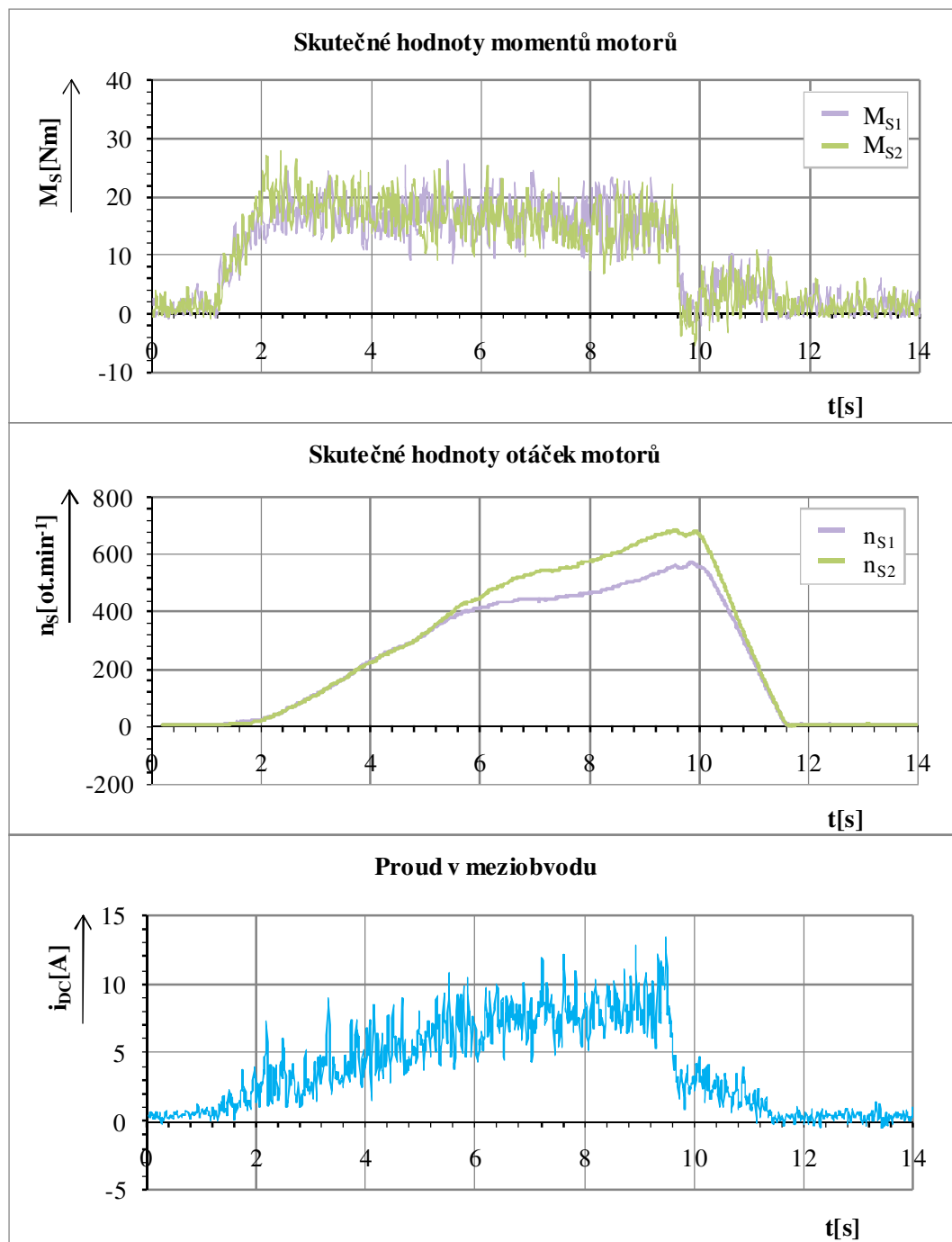


Obr. 6.28 DTC s ED – rozjezd a levotočivá zatáčka s následným couváním

Vozidlo se rozjíždí na rovném úseku vozovky a následně vjíždí do levotočivé zatáčky. Levé vnitřní kolo (s indexem 2) má nižší otáčky než vnější kolo. Základní v průběhu otáček při

vyšlápnutí plynového pedálu je způsoben vůlí v převodové skříní vozidla. Dále v čase  $t = 30\text{ s}$  dochází k přepnutí algoritmu a následnému couvání vozidla.

#### 6.2.4.4 Rozjezd s ED do pravotočivé zatáčky



Obr. 6.29 DTC s ED – rozjezd a pravotočivá zatáčka

Vozidlo se rozjíždí na rovném úseku vozovky a následně vjíždí do pravotočivé zatáčky. Pravé vnitřní kolo (s indexem 1) má nižší otáčky než vnější kolo.



### 6.2.5 Shrnutí výsledků ED při vektorovém řízení a přímém řízení momentu

Algoritmus ED s vektorovým řízením byl ověřen na válcovém dynamometru při napájení z akumulátorové baterie. Maximální hodnota celkového žádaného momentu byla ve všech měřeních nastavena na  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$  a byla použita rampa pro zvyšování a snižování momentu.

Průběh pro rozjezd s aktivním ED a vektorovým řízením je zobrazen na *Obr. 6.17*. Na obou motorech je nastavena stejná žádaná hodnota momentu  $M_{\Sigma 1} = M_{\Sigma 2} = 60 \text{ Nm}$ . Na *Obr. 6.18* bylo ověřeno rekuperační brzdění, kde byl nastaven záporný moment motorů, což mělo za následek záporný proud v meziobvodu. Odbuzením motorů na *Obr. 6.19* bylo dosaženo vyšších otáček a rovněž bylo ověřeno, že tento algoritmus pracuje bez jakýchkoli problémů.

Poté byl algoritmus ED ověřen na vozovce v různých situacích. Jako první byl ověřen rozjezd automobilu při maximálním celkovém žádaném momentu  $M_{\Sigma C} = 120 \text{ Nm}$  doplněný o couvání vozidla (*Obr. 6.21*). Jak je patrné z průběhu, při rozjezdu i následném couvání probíhalo všechno dle předpokladů. Rekuperační brzdění při nastavení  $M_{\Sigma C} = -60 \text{ Nm}$  bylo rovněž otestováno na vozovce (*Obr. 6.22*), proud v meziobvodu při začátku děje klesl pod hranici  $I_{DC} = -5 \text{ A}$ . Následovalo ověření algoritmu ED při průjezdu zatáčkou. *Obr. 6.23* zobrazuje průběhy veličin při průjezdu levotočivou zatáčkou. Z průběhu otáček motorů je zřejmé, že levému motoru (motor 2) pohánějícímu vnitřní kolo, se při vjezdu do zatáčky začínají snižovat otáčky, zatímco pravému motoru (motor 1), pohánějícímu vnější kolo, začínají zvyšovat. Přesně naopak je tomu u pravotočivé zatáčky dle *Obr. 6.24*. Na závěr byla provedena zkouška, kdy bylo rekuperační brzdění aktivováno v levotočivé zatáčce, viz *Obr. 6.25*. Jak lze z průběhu proudu v meziobvodu pozorovat, i v tomto případě tekla proud zpět do akumulátorových baterií.

Elektronický diferenciál fungující na vektorovém řízení realizovaný dle rovnice 3.3 funguje bezchybně ve všech testovaných situacích. Zároveň je algoritmus vektorového řízení použitelný pro rekuperační brzdění asynchronních motorů a umožňuje i odbuzení motorů.

Následovalo ověření ED s přímým řízením momentu. Algoritmus byl ověřen na válcovém dynamometru se zatížením při napájení z akumulátorové baterie. Pro jízdu vpřed nebo vzad je použit algoritmus, který využívá spínání jak nulových, tak aktivních vektorů. Při rekuperačním brzdění jsou spínány pouze aktivní vektory. Maximální hodnota celkového žádaného momentu byla ve všech typech měření nastavena na  $M_{\Sigma C} = 100 \text{ Nm}$  a bylo použito omezení strmosti nárůstu momentu pomocí rampy. Rampa byla méně strmá než v případě vektorového řízení z důvodu většího rozkmitu momentu vycházející z principu této metody.

Rozjezd vozidla s ED a přímým řízením momentu je zobrazen na *Obr. 6.20*. Skutečné hodnoty momentu motorů dosahují žádané poloviny celkové žádané hodnoty momentu dle předpokladů.

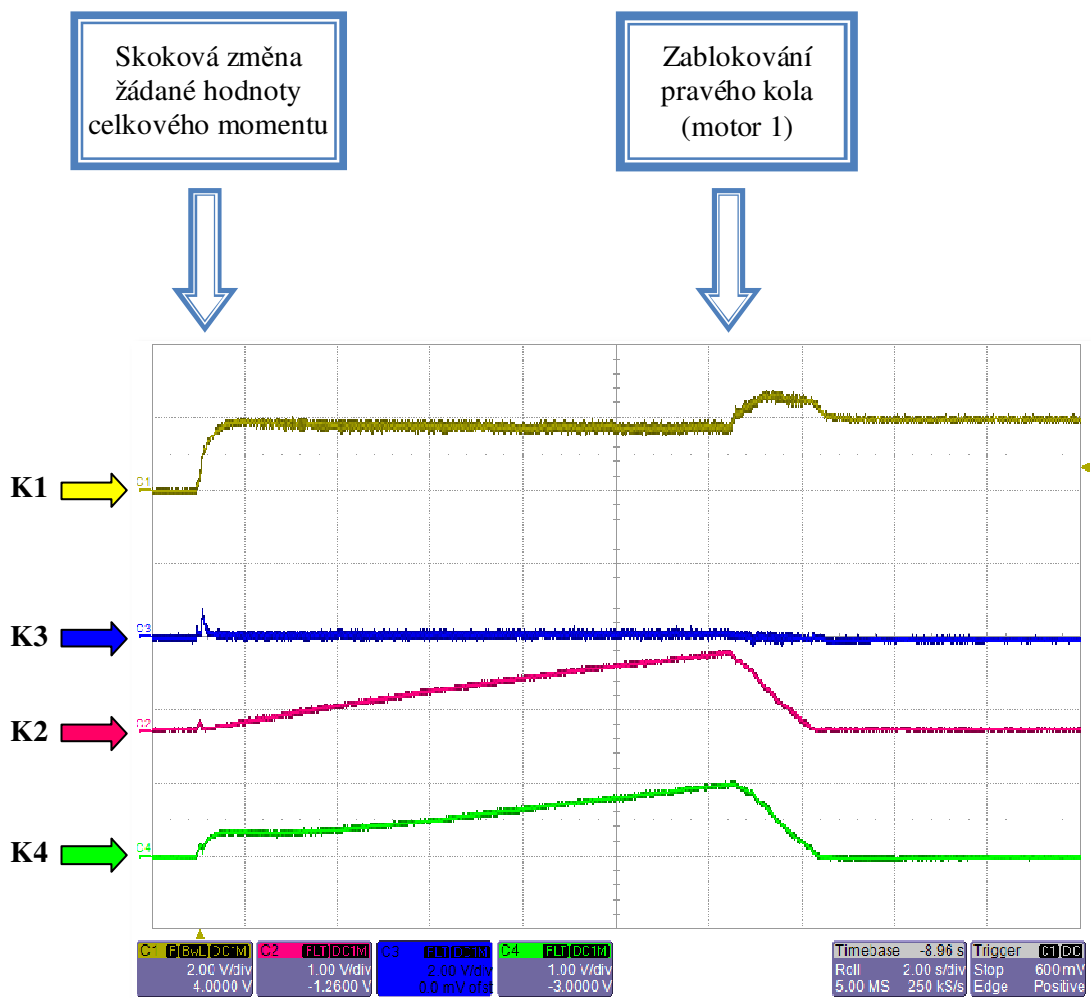
Na vozovce byl ověřen nejdříve rozjezd vozidla (*Obr. 6.26*), ze kterého lze pozorovat rovnoměrné rozdělení žádaného momentu na oba motory. Na *Obr. 6.27* je po vyšlápnutí plynového pedálu nastavena záporná hodnota celkového žádaného momentu  $M_{\Sigma C} = -40 \text{ Nm}$ . Lze pozorovat proud tekoucí zpět do baterie. Poté byl algoritmus ED při DTC řízení ověřen v zatáčkách. Průběh při průjezdu levotočivou zatáčkou i s couváním automobilu se nachází na obrázku *Obr. 6.28*. Při vjezdu do zatáčky se otáčky levého motoru (motor 2), pohánějící vnitřní kolo snižují, zatímco pravému motoru (motor 1), pohánějící vnější kolo se otáčky zvyšují. Při průjezdu pravotočivou zatáčkou dle *Obr. 6.29* je situace přesně opačná.

Z průběhů vyplývá, že navržený algoritmus ED s vektorovým řízením i s přímým řízením momentu funguje dle předpokladů, a to ve všech situacích.

### 6.2.6 Metody uzávěrek ED testované na válcovém dynamometru

Měření probíhalo tak, že **pravé kolo (motor 1)** bylo položeno na válcový dynamometr, a **levé kolo (motor 2)** bylo podepřeno tak, aby se volně protáčelo. V této konfiguraci byly prověřeny obě metody uzávěrky elektronického diferenciálu. Maximální hodnota celkového žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\Sigma C} = 25 \text{ Nm}$ . Napájení bylo řešeno z akumulátorové baterie vozidla o jmenovitém napětí 320 V.

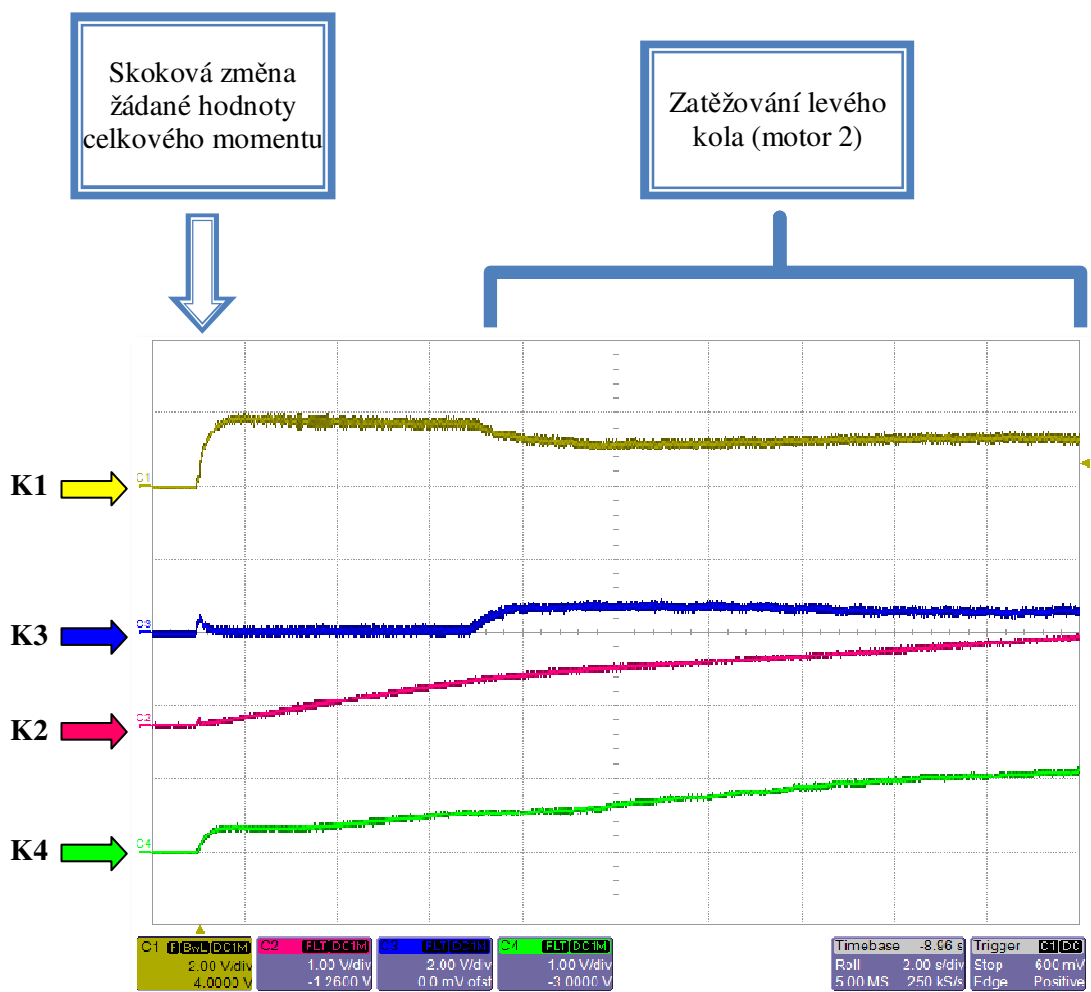
#### 6.2.6.1 Uzávěrka ED – Metoda 1



Obr. 6.30 Rozjezd při aktivní uzávěrce a následné zablokování pravého kola (M1) - Metoda 1  
**(K1:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],**  
**K3:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm/d], K4:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], t: 2 s/d)**

Jak lze z průběhu skutečných otáček motoru 2 pozorovat, při rozjezdu došlo ke krátkodobému skoku otáček tím, že je kolo nezátížené. Po chvíli začala uzávěrka pracovat a obě kola již měla stejné otáčky.

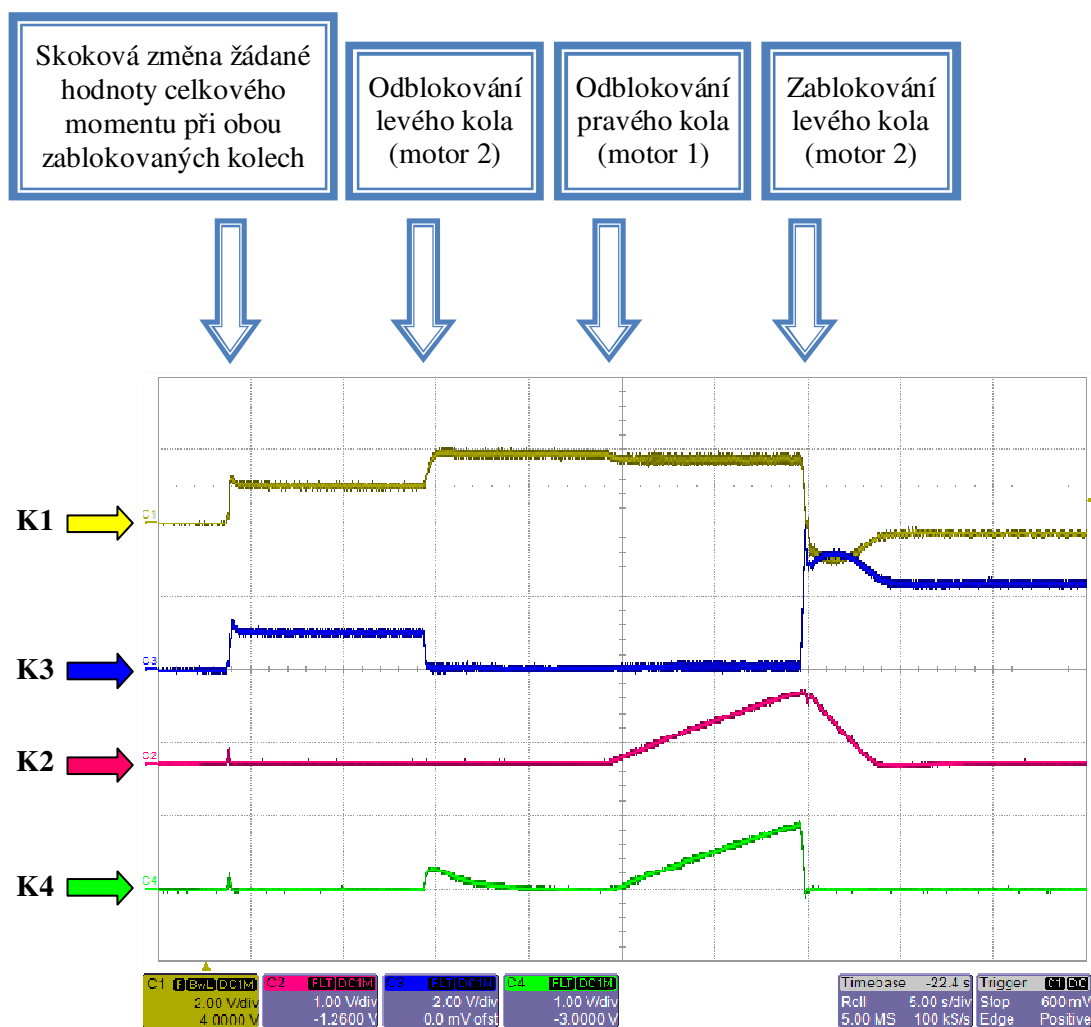
Při mechanickém zablokování kola 1, otáčky motoru 2 sledují otáčky motoru 1, a nakonec se oba motory zastaví. U motoru 1 lze pozorovat překmit skutečné hodnoty momentu, který je způsoben I regulátorem celkového momentu a je zřejmé, že tato hodnota poté klesá k žádané hodnotě 25 Nm.



Obr. 6.31 Rozjezd při aktivní uzávěrce a následné zatěžování levého kola (M2) – Metoda 1  
 (K1:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
 K3:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], K4:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], t: 2 s/d)

Je opět patrné, že při rozjezdu došlo ke krátkodobému skoku otáček, tím že se kolo volně protáčí – je nezatížené. Po chvíli začne uzávěrka pracovat a oba motory již mají stejné otáčky.

Bylo-li zatíženo kolo 2 (přímé mechanické brzdění kola), vzrostla u motoru 2 skutečná hodnota momentu, zatímco na motoru 1 moment klesl o hodnotu, která vzrostla na motoru 2. To je způsobeno závislostí dle rovnice 3.4.



Obr. 6.32 Rozjezd při aktivní uzávěrci a zablokováných kolech – Metoda 1

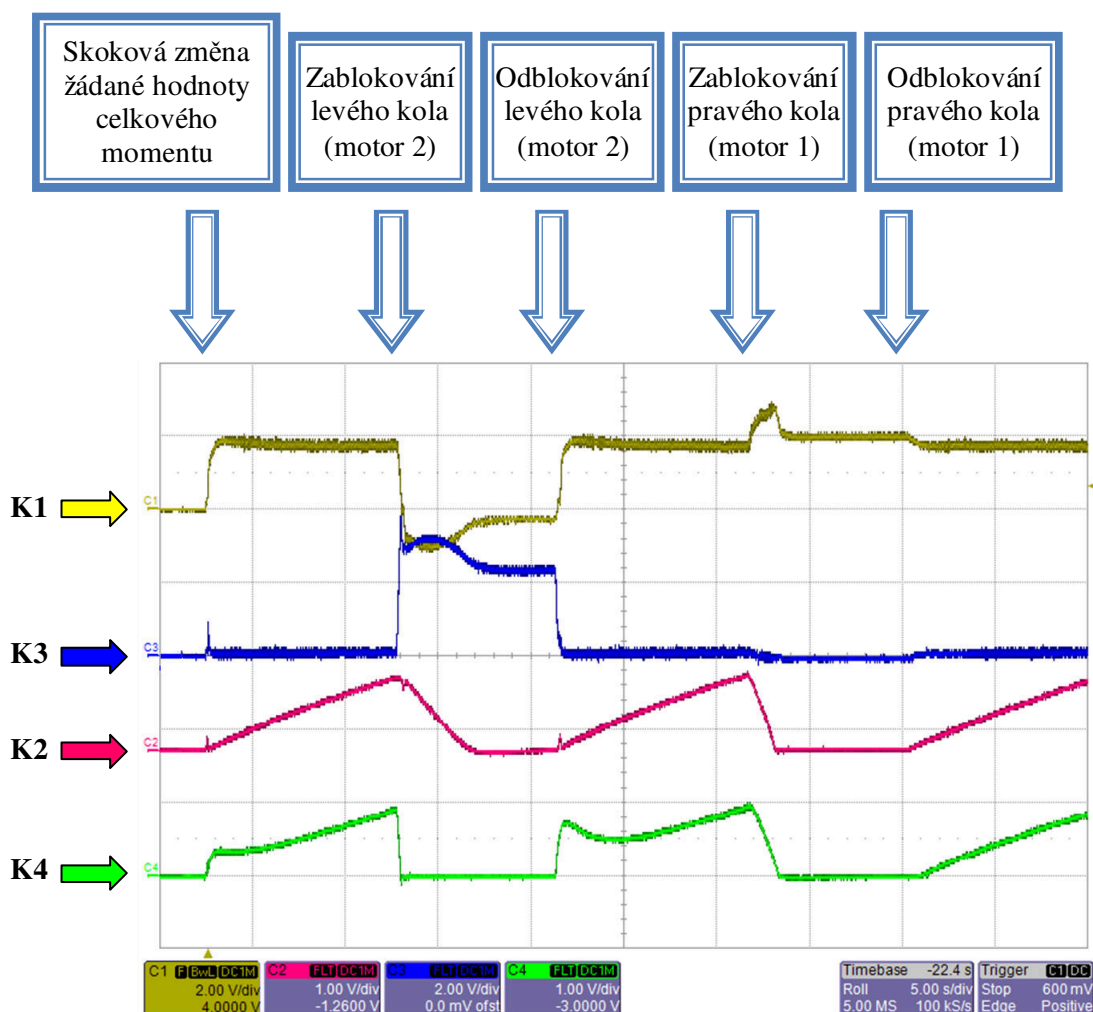
(**K1**:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], **K2**:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],

**K3**:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm/d], **K4**:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],  $t$ : 5 s/d)

V modelové situaci, kdy byly obě kola při skoku žádaného momentu zablokována, došlo k rovnoměrnému rozdělení momentů na oba motory.

Odblokování kola 2 způsobilo krátkodobý skok otáček, moment motoru 1 dosáhl hodnoty 25 Nm. Při následném odblokování kola 1 došlo k roztočení obou kol.

Na závěr bylo zablokováno kolo 2 a motor 1 se vlivem setrvačnosti válcového dynamometru zastavil později, poté byly na obou kolech nulové otáčky.



Obr. 6.33 Rozjezd při aktivní uzávěrci – Metoda 1

(**K1**:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], **K2**:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],

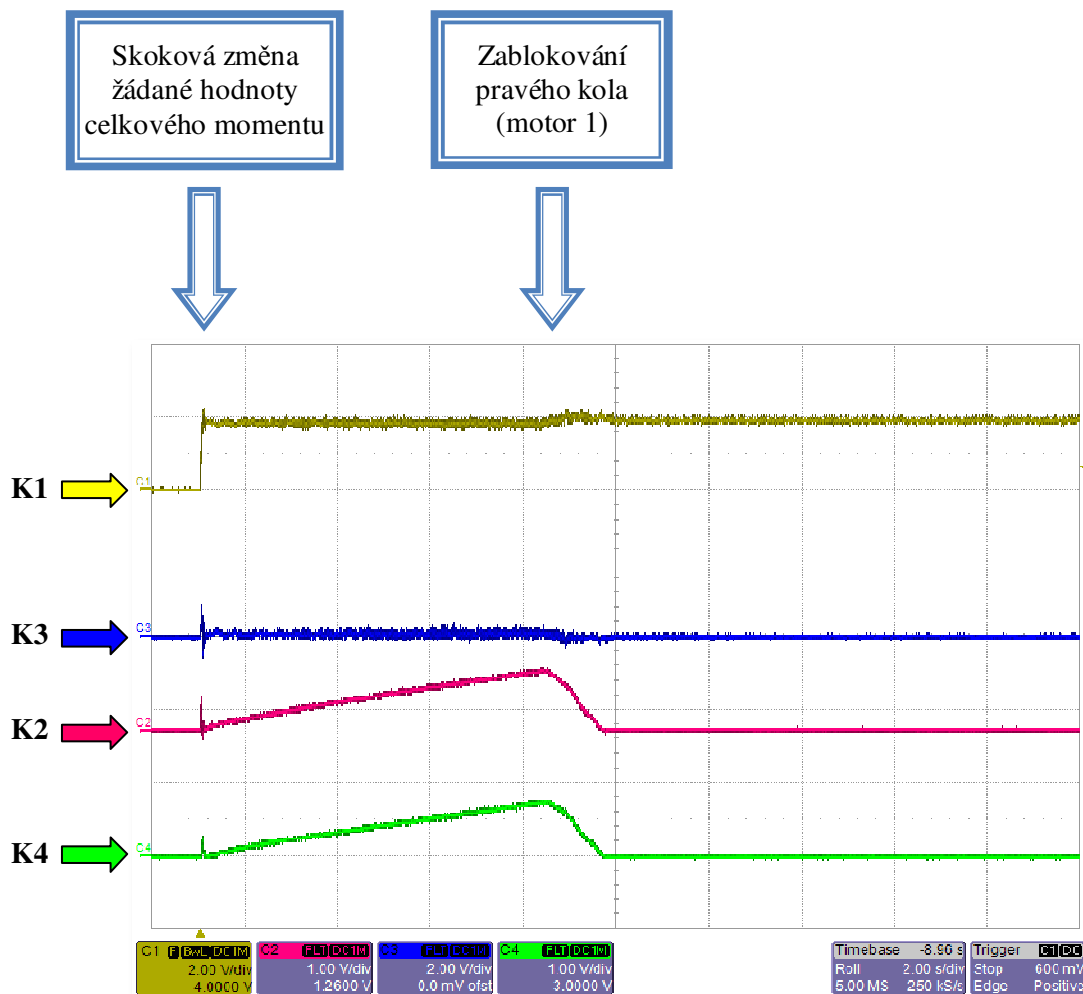
**K3**:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], **K4**:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], **t**: 5 s/d)

Nakonec byla ověřována situace, kdy při skoku žádaného momentu se neblokovaná kola roztáčejí, u motoru došlo 2 ke krátkodobému skoku otáček. Poté jsou již otáčky obou motorů stejné.

Zablokování kola 2 způsobilo překmit momentu jeho motoru, moment motoru 1 dosáhl záporné hodnoty. Při následném odblokování kola 2 došlo k roztáčení obou kol, u motoru 2 je pozorovatelný větší překmit otáček. Otáčky jsou poté opět stejné.

Při následném zablokování kola 1 otáčky motoru 2 okamžitě sledují otáčky motoru 1. Po odblokování kola 1 dochází k roztáčení obou kol.

## 6.2.6.2 Uzávěrka ED – Metoda 2



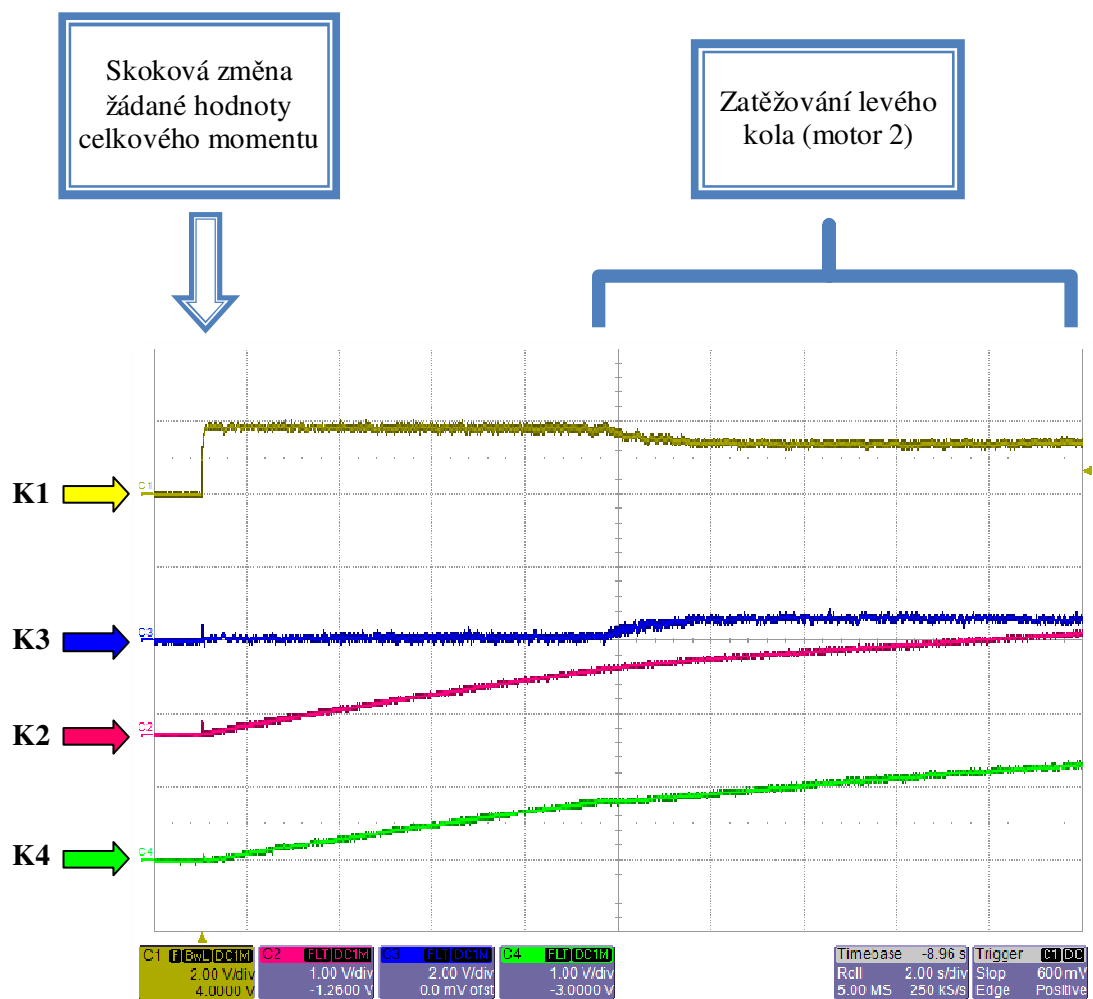
Obr. 6.34 Rozjezd při aktivní uzávěrce a následné zablokování pravého kola (M1) – Metoda 2

(K1:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],

K3:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], K4:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], t: 2 s/d)

Jak lze z průběhu skutečných otáček motoru 2 pozorovat, při této metodě nedošlo při rozjezdu ke krátkodobému skoku otáček jako u metody 1. Uzávěrka zareagovala okamžitě a obě kola již mají stejné otáčky.

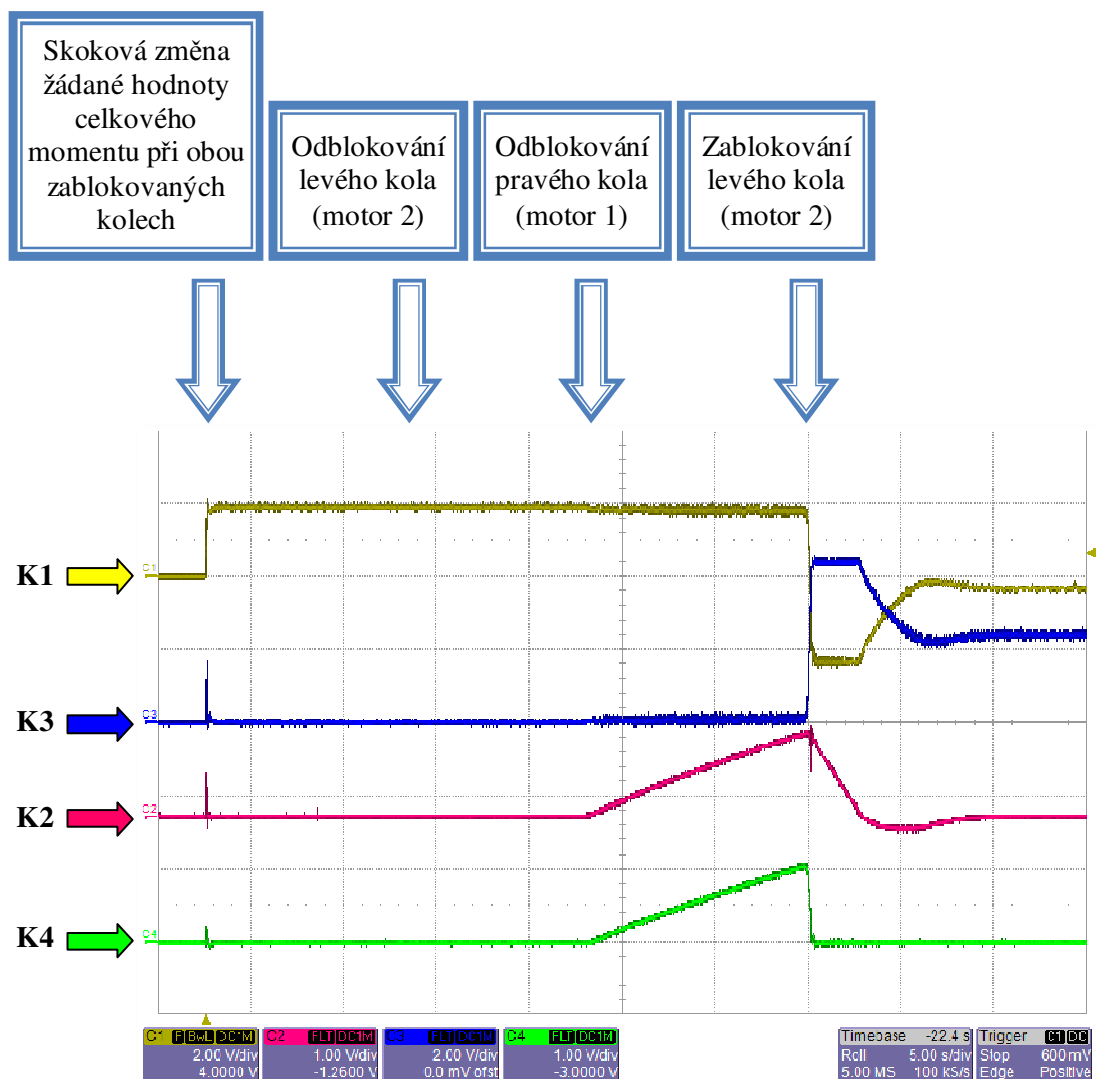
Při mechanickém zablokování kola 1, otáčky motoru 2 sledují otáčky motoru 1 a nakonec se oba motory zastaví. U motoru 1 lze pozorovat menší překmit skutečné hodnoty momentu než u metody 1.



Obr. 6.35 Rozjezd při aktivní uzávěrci a následné zatěžování levého kola (M2) – Metoda 2  
 (K1:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
 K3:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], K4:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], t: 2 s/d)

Jak lze opět z průběhu skutečných otáček motoru 2 pozorovat, při této metodě nedošlo při rozjezdu ke krátkodobému skoku otáček, jako u metody 1. Uzávěrka zareagovala okamžitě a obě kola mají stejné otáčky.

Bylo-li zatíženo kolo 2 (přímé mechanické brzdění kola), vzrostla u motoru 2 skutečná hodnota momentu, zatímco na motoru 1 moment klesl o hodnotu, která vzrostla na motoru 2. Jde tedy o obdobný jev jako u metody 1.



Obr. 6.36 Rozjezd při aktivní uzávěrci a zablokování kolech – Metoda 2

(**K1**:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], **K2**:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],

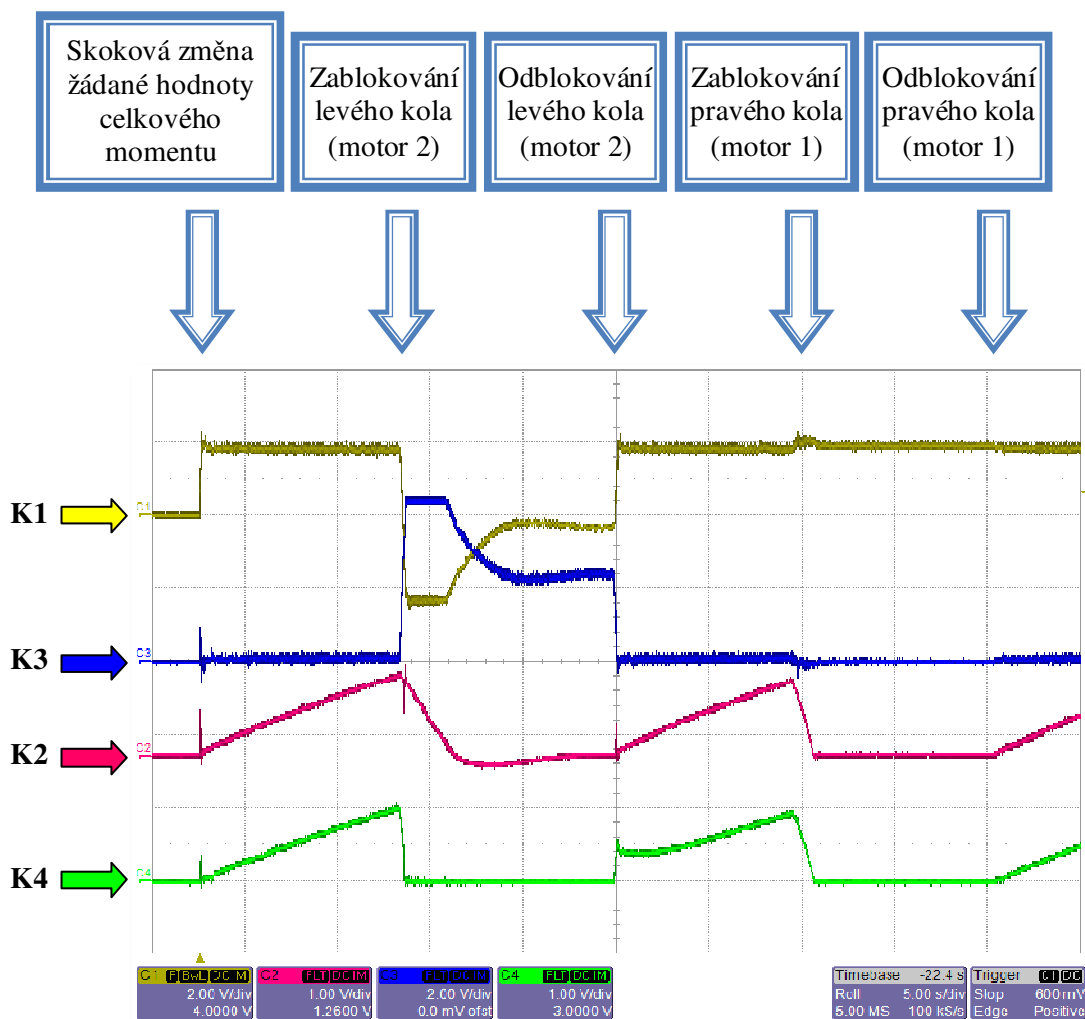
**K3**:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], **K4**:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],  $t$ : 5 s/d)

V situaci, kdy byly obě kola při skoku žádaného momentu zablokována, nedošlo k rovnoměrnému rozdělení momentů na oba motory, jako u metody 1, ale veškerý moment byl přenášen motorem 1.

Odblokování kola 2 nezpůsobilo krátkodobý skok otáček. Na motoru 1 je stále žádaná hodnota momentu 25 Nm. Při následném odblokování kola 1 došlo k roztočení obou kol.

Na závěr bylo zablokováno kolo 2 a motor 1 se vlivem setrvačností válcového dynamometru zastaví později. Na průběhu otáček motoru 1 lze pozorovat záporné otáčky vlivem záporného momentu. Poté jsou na obou kolech nulové otáčky.





Obr. 6.37 Rozjezd při aktivní uzávěrce – Metoda 2

(K1:  $M_{S1} = f(t)$  [25 Nm/d], K2:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d],  
K3:  $M_{S2} = f(t)$  [25 Nm /d], K4:  $n_{S2} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], t: 5 s/d)

Nakonec byla ověřována situace, kdy při skoku žádaného momentu se neblokovaná kola roztáčí. Uzávěrka zareagovala okamžitě a obě kola mají stejné otáčky.

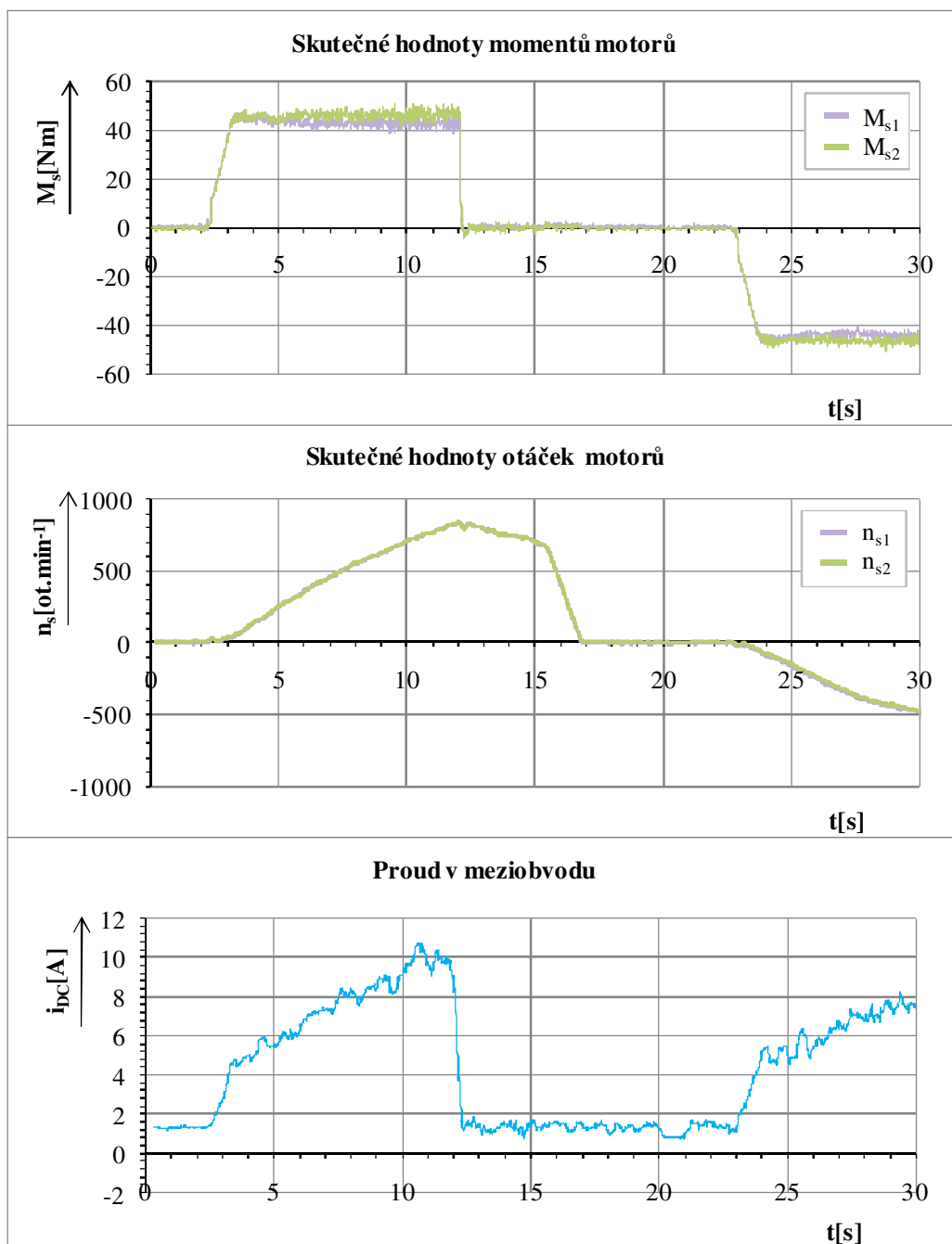
Zablokování kola 2 způsobilo překmit momentu jeho motoru vlivem závislosti z rovnice 3.5, moment motoru 1 dosáhl záporné hodnoty a jeho otáčky jsou také záporné. Při následném odblokování kola 2 došlo k roztáčení obou kol, u motoru 2 je již pozorovatelný překmit otáček. Otáčky jsou poté opět stejné.

Při následném zablokování kola 1 otáčky motoru 2 okamžitě sledují otáčky motoru 1. Po odblokování kola 1 dochází k roztáčení obou kol.

### 6.2.7 Metody uzávěrek ED testované na vozovce – Metoda 1

V průběžích index 1 označuje pravé kolo spjaté s motorem 1 (fialová barva), index 2 označuje levé kolo vozidla (zelená barva). Maximální hodnota celkového žádaného momentu byla nastavena na  $M_{\Sigma C} = 90 \text{ Nm}$ . Napájení bylo řešeno z akumulátorové baterie vozidla o jmenovitém napětí 320 V.

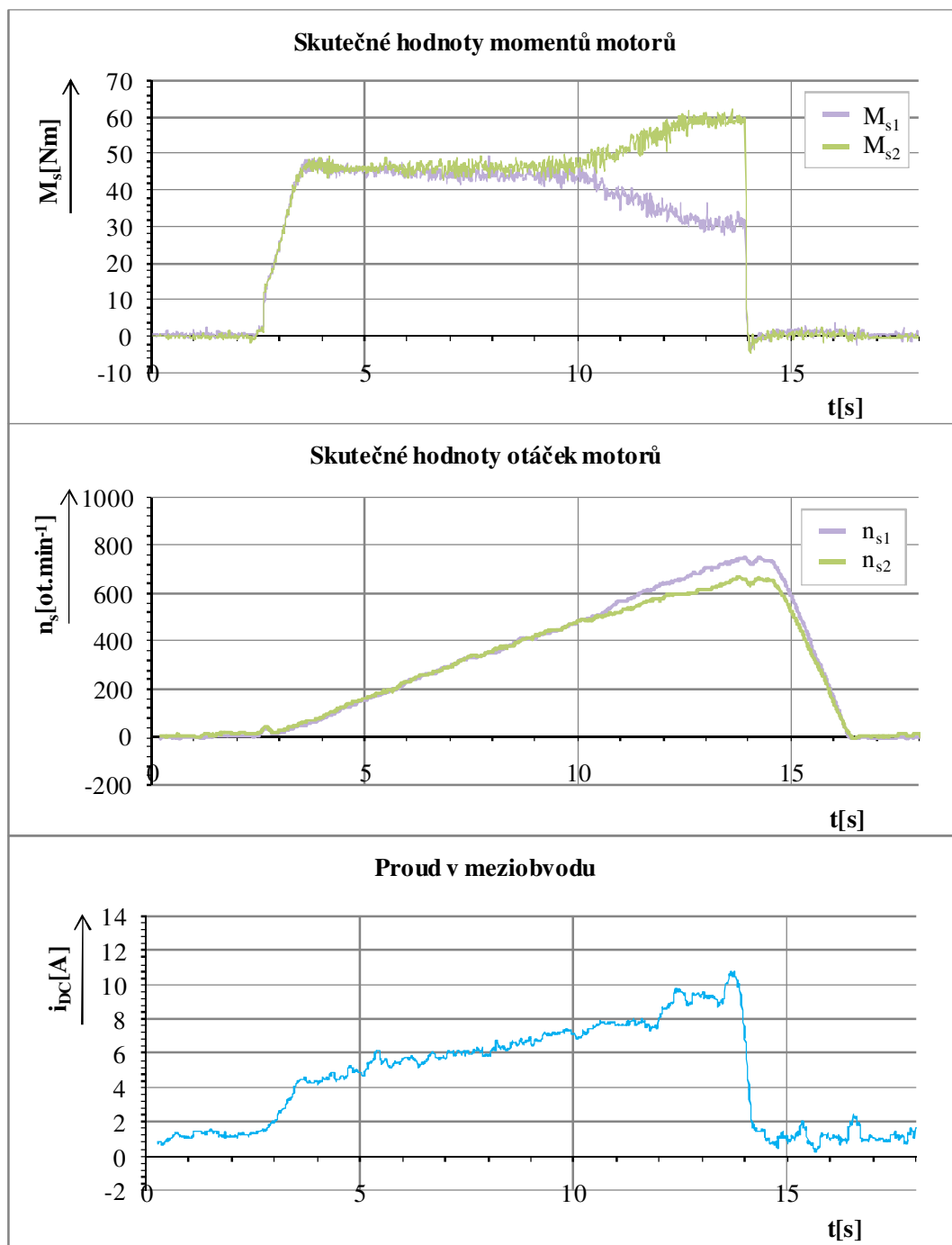
#### 6.2.7.1 Metoda 1 rozjezd



Obr. 6.38 Rozjezd při aktivované uzávěrci dle Metody 1

Z průběhu je patrné, že žádaný moment je rovnoměrně rozdělen na oba motory.

## 6.2.7.2 Metoda 1 rozjezd do levotočivé zatáčky

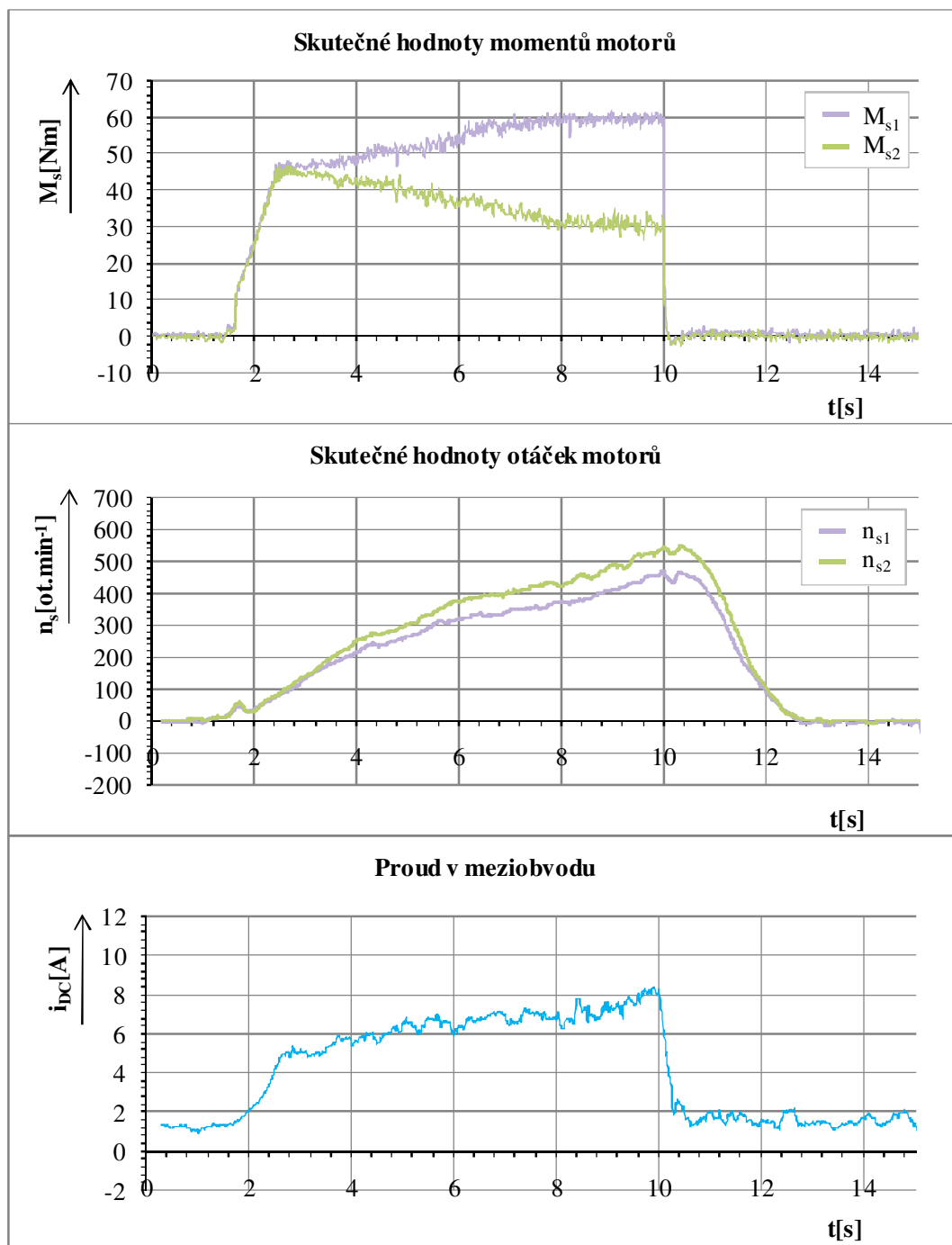


Obr. 6.39 Rozjezd a levotočivá zatáčka při aktivované uzávěrce dle Metody 1

V čase  $t = 10$  kdy, kdy vozidlo vjíždí do zatáčky, začíná uzávěrka rozdělovat momenty a to tak, že na motor vnějšího kola (index 1) přivádí nižší moment než na motor kola vnitřního (index 2). Toto rozdělení momentů vychází z rovnice 3.4.

Lze usuzovat, že uzávěrka pracuje dle předpokladů i na vozovce při průjezdu zatáčkou.

## 6.2.7.3 Metoda 1 rozjezd do pravotočivé zatáčky

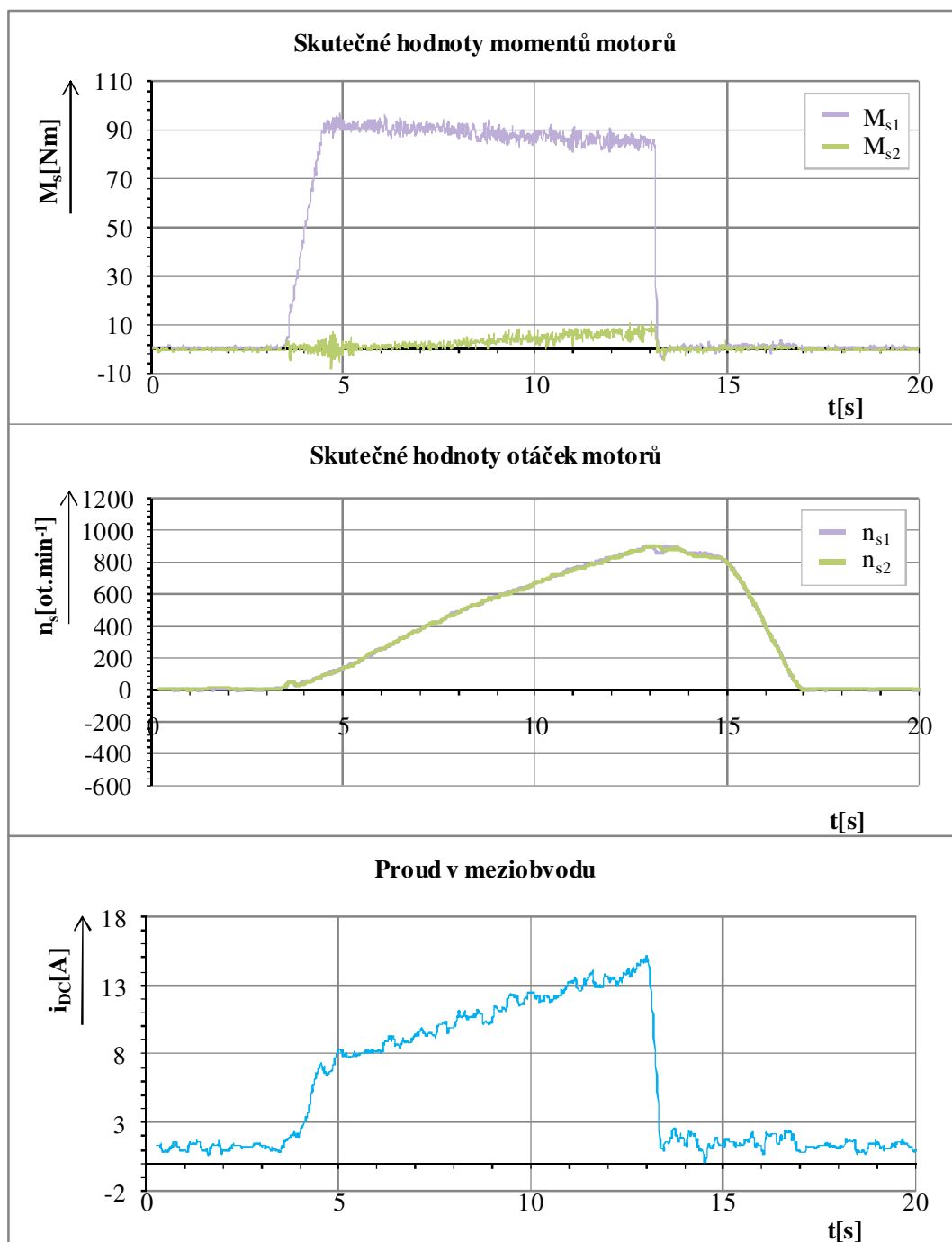


Obr. 6.40 Rozjezd a pravotočivá zatáčka při aktivované uzávěrce dle Metody 1

Při průjezdu pravotočivou zatáčkou pracuje uzávěrka tak, že na motor vnějšího kola (index 2) přivádí nižší moment než na motor vnitřního kola.

## 6.2.8 Metody uzávěrek ED testované na vozovce – Metoda 2

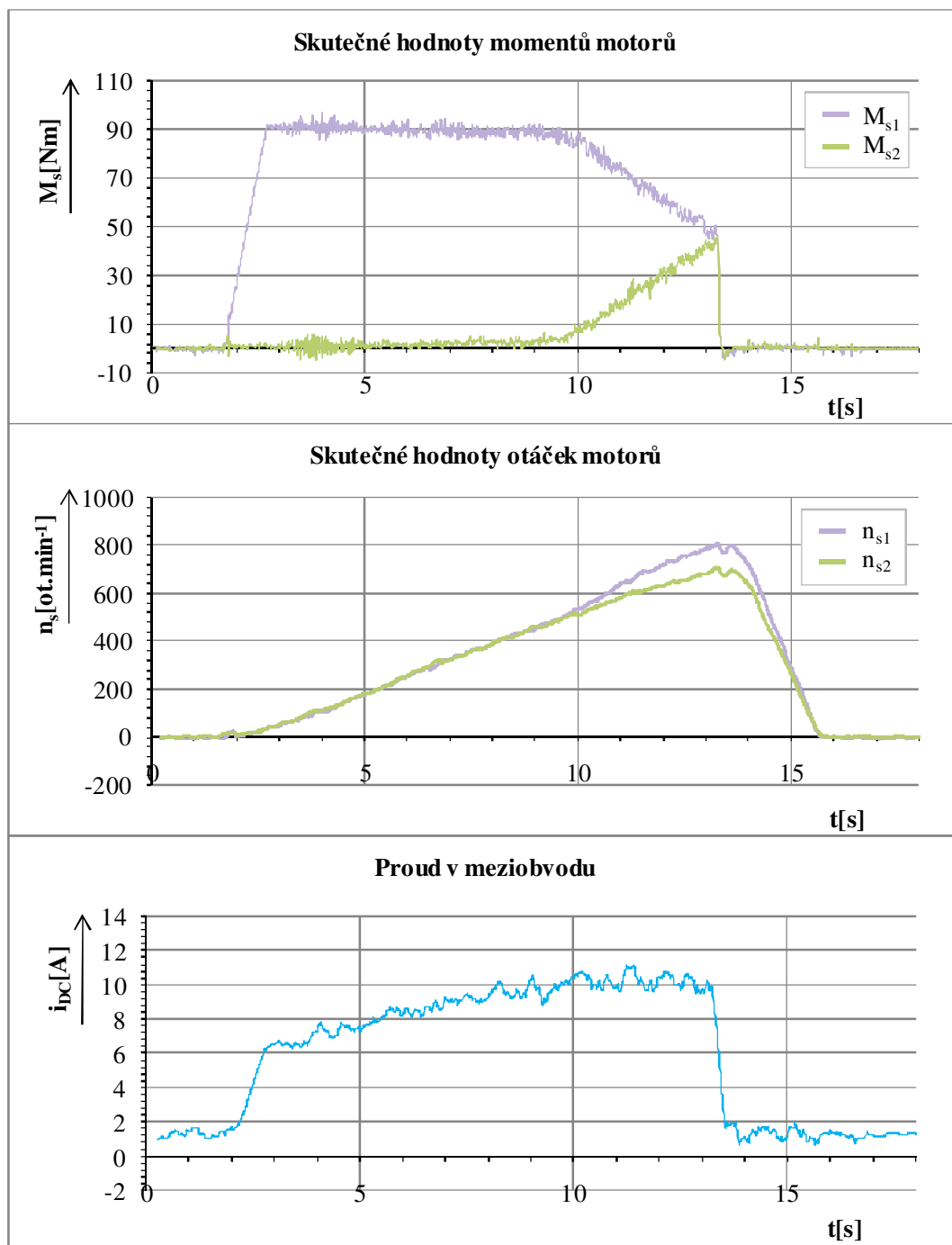
### 6.2.8.1 Metoda 2 rozjezd



Obr. 6.41 Rozjezd při aktivované uzávěrci dle Metody 2

Rozjezd při aktivní uzávěrci podle Metody 2, způsobí nerovnoměrné rozdělení momentů, přesněji žádaný moment je přenášen pouze motorem 1.

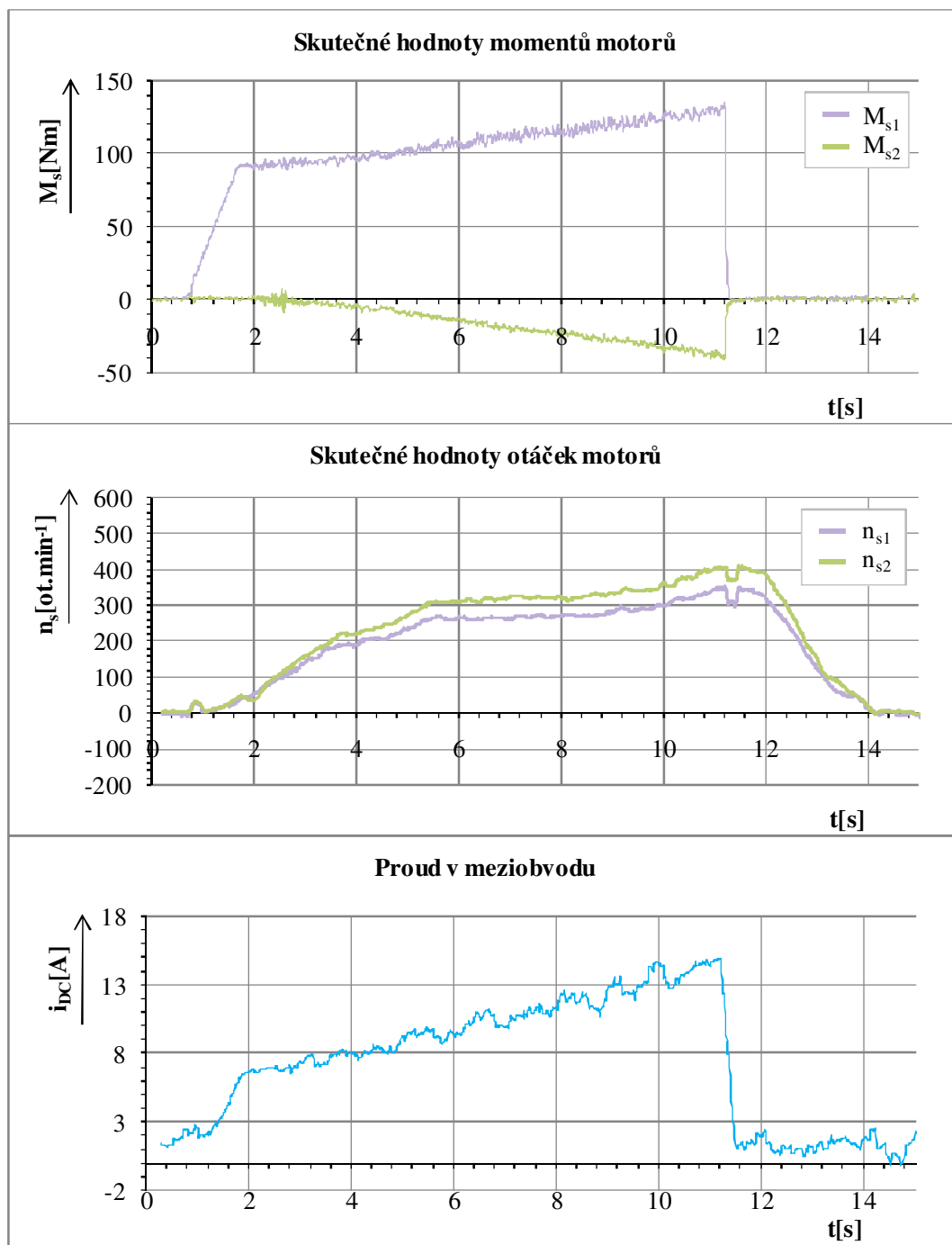
## 6.2.8.2 Metoda 2 rozjezd do levotočivé zatáčky



Obr. 6.42 Rozjezd a levotočivá zatáčka při aktivované uzávěrce dle Metody 2

Při vjezdu do levotočivé zatáčky v čase  $t = 9,5$  s provede uzávěrka ED dle Metody 2 rozdělení momentů, kdy moment na motoru vnějšího kola (index 1) snižuje a tímto se zvyšuje moment motoru vnitřního kola (index 2). Toto rozdělení momentů vychází z rovnice 3.5.

## 6.2.8.3 Metoda 2 rozjezd do pravotočivé zatáčky



Obr. 6.43 Rozjezd a pravotočivá zatáčka při aktivované uzávěrce dle Metody 2

U pravotočivé zatáčky je opět snižován moment motoru vnitřního kola (index 2) a tímto je zvýšen moment motoru vnějšího kola o stejnou část. Opět můžeme usuzovat, že i uzávěrka elektronického diferenciálu dle Metody 2 pracuje dle předpokladů.

### 6.2.9 Shrnutí výsledků metod uzávěrek elektronického diferenciálu

Testování algoritmů uzávěrek elektronického diferenciálu probíhalo nejprve v konfiguraci, kdy pravé kolo (motor 1) bylo položeno na válcový dynamometr, levé kolo (motor 2) bylo podloženo tak, aby se volně protáčelo. Takto byly otestovány čtyři situace pro dvě navržené metody uzávěrek elektronického diferenciálu (viz kapitola 3.2 *Modely ED a simulační výsledky*).

V první situaci byla nastavena skoková změna celkového žádaného momentu  $M_{\Sigma C} = 25 \text{ Nm}$ . Jak lze pozorovat z *Obr. 6.30* pro Metodu 1 veškerý moment je přesunutý na motor 1 spjatý s kolem umístěným na válcovém dynamometru, na motoru 2 je pouze nepatrná část, sloužící pro urychlení volně se protáčejícího kola. Otáčky tohoto motoru skokově zvýší, ale po ustálení přechodového děje se již otáčky motoru 2 zachytí na otáčky motoru 1. Při mechanickém zablokování kola umístěného na válcovém dynamometru dojde ke stejnému ději i u kola druhého. Sledujeme-li stejnou situaci u Metody 2 (*Obr. 6.34*), zjistíme, že se otáčky motoru 2 v tomto případě skokově nezmění, ale okamžitě sledují průběh otáček motoru 1. Tato metoda má také menší překmit momentu na motoru kola umístěného na válcích.

Na *Obr. 6.31* (pro metodu 1) resp. *Obr. 6.35* (pro metodu 2) je změřen rozjezd obou motorů a následné mechanické zatěžování motoru 2 (volně se protáčejícího). Jak lze pozorovat u obou metod při zatěžování motoru 2 dojde ke zvýšení momentu na tomto motoru, zatímco hodnota momentu motoru 1 klesne o tuto část.

*Obr. 6.32* resp. *Obr. 6.36* zobrazují situace, kdy nejdříve jsou obě kola mechanicky zablokována, poté je nastavena žádaná hodnota celkového momentu. U Metody 1 se žádaný moment rovnoměrně rozdělí na oba motory, Metoda 2 přenesla žádaný moment pouze na motor 1. Následuje odblokování levého kola (motor 2), kdy u metody 1 nastane opět otáčkový překmit, poté se otáčky ustálí na nule. Je-li poté odblokováno i druhé kolo, umístěné na válcovém dynamometru, začnou se otáčky zvyšovat stejně na obou motorech, což platí u obou metod uzávěrky elektronického diferenciálu. Při zablokování levého kola (motor 2) uzávěrka funguje u obou metod, protože otáčky motoru 1 klesnou na nulu, delší doba zastavení je dána setrvačností válců. Metoda 2 má v tomto případě větší překmit momentu ve srovnání s Metodou 1.

Poslední testovaná situace shrnuje poznatky z předešlých tří (*Obr. 6.33*, resp. *Obr. 6.37*).

U Metody 1 dochází při přechodových dějích k překmitu otáček motoru, jež pohání volněji se protáčející kolo. Zároveň na zatíženém kole při jeho mechanickém zablokování dochází k překmitu momentu. Výhodou této metody je rovnoměrné rozdělení celkového žádaného momentu na oba motory.

Metoda 2 reaguje na skokové změny momentu bez otáčkového překmitu u motoru volně se protáčejícího kola. Moment je přenesen pouze na jeden motor. Z průběhů je také zřejmý větší překmit momentů při přechodových dějích než u Metody 1.

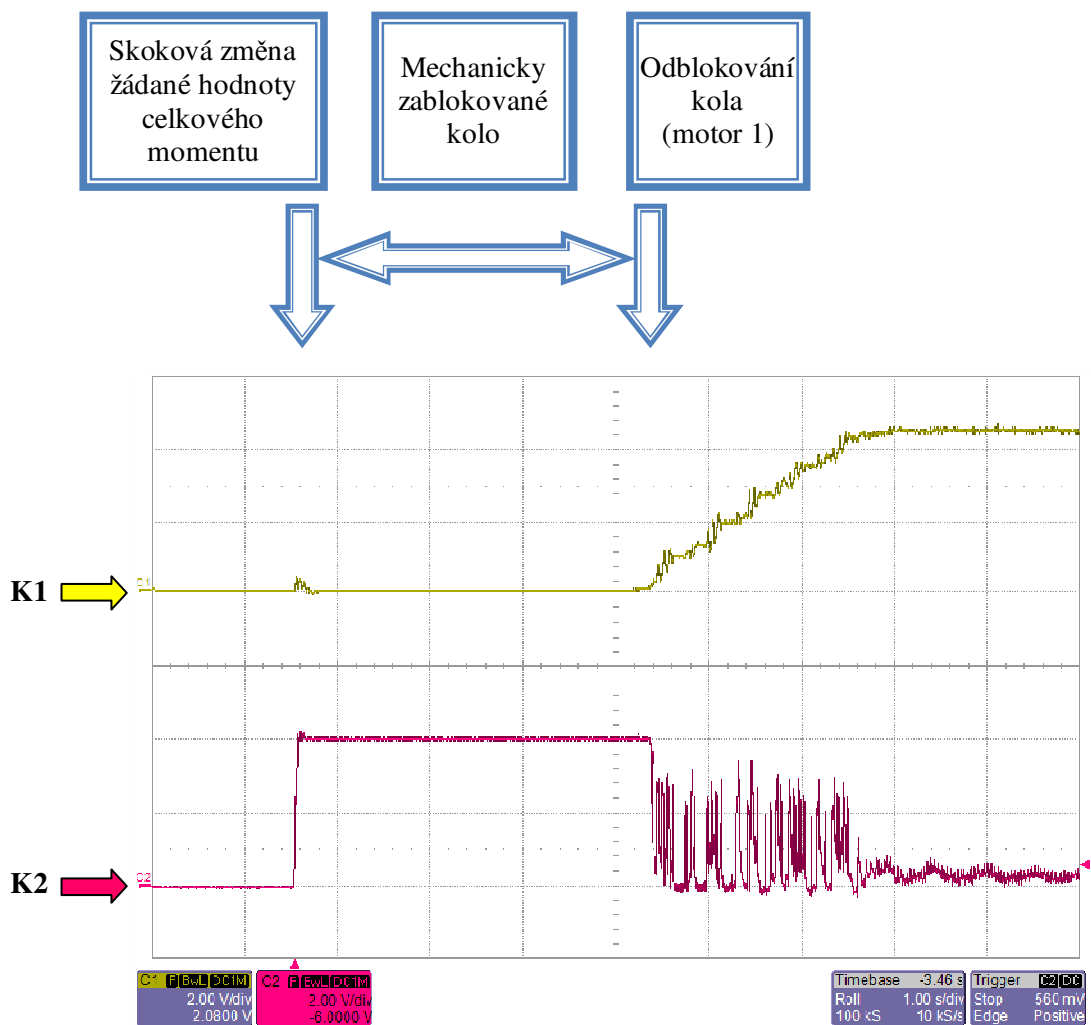
Při ověření metod uzávěrek na vozovce byly potvrzeny závěry z měření na válcovém dynamometru. Rozjezd na rovném úseku vozovky znamenal u Metody 1 rovnoměrné rozdělení žádaného momentu na motory (*Obr. 6.38*), zatímco u Metody 2 rozjezd zajistil pouze motor 1 pravého kola vozidla (*Obr. 6.41*). Také při rozjezdu došlo ke krátkodobému rozkmitu momentů na motorech.

V zatáčkách dopadlo testování dle předpokladů z *Obr. 6.39*, *Obr. 6.40*, *Obr. 6.42*, a *Obr. 6.43* vyplývá, že snižují-li se v zatáčce otáčky motoru vnitřního kola, tak algoritmus zareaguje tím, že začne zvyšovat moment tohoto motoru, zatímco na druhém motoru se moment snižuje o stejnou část, což je v souladu s korektní funkcí algoritmů uzávěrek ED.



### 6.2.10 Protiprokluzová funkce

Realizovaná protiprokluzová funkce zajišťuje okamžité snížení momentu motoru při překročení maximální hodnoty zrychlení. Sníží-li se hodnota zrychlení pod nastavenou mez, dojde k obnově momentu na kole, a tak i k opětovnému nárůstu zrychlení. Důsledkem této metody dojde k pozvolnému zvyšování otáček motoru.



Obr. 6.44 Protiprokluzová funkce fungující s vektorovým řízením,  $M_{\Sigma C} = 27,5 \text{ Nm}$   
(K1:  $n_{S1} = f(t)$  [400 ot.min<sup>-1</sup>/d], K2:  $M_{S1} = f(t)$  [27,5 Nm/d])

Jak lze z průběhu pozorovat, je-li kolo mechanicky zablokováno, je vyvíjen maximální moment, odlehčí-li se kolo, tak je při překročení nastaveného limitu zrychlení motoru okamžitě snížen moment motoru. Tento způsob protiprokluzové funkce dovolí pomalé roztočení kola.

### 6.2.11 Funkce rekuperačního brzdění

Funkce elektrického brzdění byla teoreticky rozebrána v kapitole 3.1.2, poté byla ověřena jak ve spojení s vektorovým řízením asynchronního motoru, tak s přímým řízením momentu.

Rekuperační brzdění je možno používat samostatně, nebo ve spolupráci s mechanickými brzdami. Z principu je velice jednoduché nastavovat různé hodnoty brzdné síly (záporný moment motoru) pro realizaci rekuperačního brzdění v různých situacích.

Otázka součinnosti mechanických brzd a funkce rekuperačního brzdění může být řešena pomocí otáček kol (resp. motoru) a velikostí brzdného momentu.

Při nízkých rychlostech vozidla je vhodné provádět brzdění jen mechanickými třecími brzdami. V případech, kdy jsou otáčky kol vyšší než minimální hranice pro rekuperační brzdění a brzdné zpomalení je zároveň menší než maximální dosažitelné zpomalení, je veškerá brzdná síla působící na kola produkována rekuperačním brzděním elektromotoru a není potřeba ji doplňovat mechanickými brzdami. V posledním případě, kdy požadované brzdné zpomalení větší než daná hodnota maximálního dosažitelného zpomalení za použití jen rekuperačního brzdění, je brzdný výkon zajišťován rekuperačním brzděním i mechanickými brzdami pro zajištění optimálního brzdného výkonu.

Pro optimalizaci energie akumulátorové baterie je nutno určit okamžik, kdy je rekuperační brzdění nutno deaktivovat. Neboť, jak bylo řečeno v kapitole 3.1.2, rekuperační brzdění přechází do protiproudého brzdění, které spotřebovává energii. Deaktivace může nastat ve dvou případech:

- 1 - při detekci kladného proudu v meziobvodu
- 2 - při detekci nulových otáček

Kdy v prvním případě předejdeme protiproudému brzdění, a tedy elektrické brzdění nebude spotřebovávat energii z akumulátorové baterie.

Ovšem v městském provozu je vhodnější používat i brzdění protiproudem, neboť tímto způsobem se výrazně sníží opotřebení brzdové soustavy vozidla.

---

## Závěr

Vozidla se spalovacími motory obsahují mechanický diferenciál zajišťující rozdělení hnacího momentu na poháněná kola spolu s funkcemi, jako je např. ABS, ASR nebo komplexní funkce ESP, dochází k výraznému zlepšení ovladatelnosti vozidla. Tato disertační práce se zabývala realizací funkcí elektronického diferenciálu ve vozidle s nezávislým pohonem kol přední nápravy, realizovaný elektrickým pohonem. Vozidlo s elektrickým pohonem je postaveno na karoserii Kaipan 14.

Byla provedena analýza funkce mechanického diferenciálu a dalších funkcí s ním spojených, na jehož základě byly vytvořeny simulační modely elektronického diferenciálu a doplňkových funkcí. Tyto modely byly následně implementovány do řídicího algoritmu pohonu reálného vozidla. Na závěr došlo k ověření všech navržených algoritmů v reálných podmínkách.

Měřením na starším typu vozidla vybaveným jedním napětovým střídačem, které napájí oba asynchronní motory přední nápravy s řízením zajišťujícím konstantní magnetický tok stroje ( $U/f = konst.$ ) bylo zjištěno, že tento způsob není vhodný z hlediska ovladatelnosti vozidla a spotřeby elektrické energie. Byla použita nová koncepce dvojitého napětového střídače s řídicími jednotkami umožňující řízení otáček/momentu obou motorů nezávisle, která je jednoznačným přínosem pro zlepšení dynamického chování a spotřebu tohoto vozidla. Pro řízení otáček/momentu asynchronních motorů byly vybrány metody vektorového řízení a přímého řízení momentu. Výhodou metod je přechod do generátorického režimu s ohledem na rekuperaci energie zpět do akumulátorové baterie. Metody vektorového řízení a přímého řízení momentu byly implementovány do digitálního signálového kontroléru Freescale 56F8037. Poté byla ověřena jejich funkčnost na laboratorním stanovišti.

Komunikace mezi řídicími jednotkami je nezbytná pro realizaci jak základní funkce, tak všech doplňkových funkcí, neboť je nutná výměna okamžitých hodnot skutečných otáček, momentů a stavových příkazů. Rozhraní SPI bylo vybráno pro implementaci funkcí elektronického diferenciálu. Sběrnice CAN slouží pro připojení pohonu vozidla na jednotnou komunikační sběrnici. Navržené komunikační algoritmy byly úspěšně ověřeny na laboratorním stanovišti při součinnosti s oběma metodami řízení.

Základní funkcí elektronického diferenciálu je rozdělení celkového žádaného momentu na oba motory. Algoritmus realizující funkci elektronického diferenciálu rozdělí celkový žádaný moment, reprezentovaný pedálem plynu, na asynchronní motory ve stejném poměru. Jeho ověření nejdříve proběhlo v prostředí Matlab/Simulink a bylo prokázáno, že při průjezdu vozidla zatáčkou jsou otáčky jednotlivých kol rozdílné, zatímco momenty strojů stejné, jak tomu má být dle předpokladů.

Poté byl algoritmus implementován s použitím jak vektorového řízení, tak přímého řízení momentu. Ověření algoritmu elektronického diferenciálu testovaného na válcovém dynamometru proběhlo u obou metod řízení úspěšně. Byly odzkoušeny funkce rekuperačního brzdění a odbuzení motorů, které byly rovněž úspěšně ověřeny. Následovalo ověření funkce elektronického diferenciálu v reálných podmínkách na vozovce v několika režimech a při průjezdu zatáčkou. Rekuperační brzdění aktivované po rozjezdu vozidla prokázalo svou funkčnost i na vozovce. Při průjezdu vozidla levotočivou zatáčkou byly potvrzeny simulační výsledky, tedy momenty na obou motorech jsou shodné a otáčky motoru vnitřního kola jsou menší než vnějšího, což potvrdil i průjezd pravotočivou zatáčkou. Navržený algoritmus ve všech těchto situacích fungoval bezchybně.

---

Dále byla simulačně ověřena jedna z doplňkových funkcí, a to uzávěrka diferenciálu. Byly vytvořeny dvě metody realizující tuto funkci. Ze simulačních výsledků je patrné, že u obou metod bylo možno provést jejich implementaci v reálném systému vozidla s elektrickým pohonem.

Metody uzávěrek elektronického diferenciálu byly implementovány do algoritmu vektorového řízení a nejdříve ověřeny tak, že pravé kolo vozidla bylo položeno na válcový dynamometr a druhé bylo podepřeno, aby se volně protáčelo. Bylo ověřeno několik situací, ze kterých bylo vyvozeno chování jednotlivých metod. U Metody 1 dochází za normální situace k rovnoměrnému rozdělení momentů na oba motory kol na rozdíl od Metody 2, kdy je veškerý žádaný moment přenesen pouze na motor jednoho kola. Na volně protáčejícím se kole u Metody 1 dochází k otáčkovému překmitu. Avšak jak bylo zjištěno z chování obou metod na vozovce, obě metody jsou použitelné jako uzávěrky elektronického diferenciálu ve vozidle s elektrickým pohonem.

Byl otestován algoritmus protiprokluzové funkce vycházející z detekce zrychlení motoru. Překročí-li zrychlení nastavenou mez, dojde ke snížení momentu na motoru. Sníží-li se zrychlení pod tuto mez, dojde k obnově momentu a motor začne zrychlovat. Tímto způsobem dochází k pozvolnému nárůstu otáček motoru.

U funkce rekuperačního brzdění je důležité určení okamžiku, kdy je vhodné tuto funkci aktivovat a deaktivovat. V městském provozu by se jevilo jako vhodnější využívat funkci rekuperačního brzdění, neboť by nedocházelo k tak častému a intenzivnímu používání mechanických brzd. To by vedlo k menšímu opotřebení brzdové soustavy vozidla. Na druhé straně stojí spotřeba energie. Při aktivaci funkce elektrické brzdy nastává nejdříve rekuperační brzdění, a poté protiproudé, které již energii z akumulátorové baterie spotřebovává.

Nespornou výhodou vozidla s elektrickým pohonem je dynamická stránka celé soustavy, kde moment setrvačnosti je nižší než moment setrvačnosti klasického vozidla se spalovacím motorem, neboť u elektromotoru se žádané změny projeví okamžitě.

Lze usuzovat, že stanovené cíle byly splněny jak po teoretické, tak po praktické stránce. Získané poznatky mohou být využity k dalšímu zlepšení a rozvoji funkcí spjatých s elektronickým diferenciálem ve vozidlech s elektrickým pohonem. Vyvinutý systém je připraven k možnému rozšíření přídavných senzorů, jako je například snímač úhlu natočení volantu nebo snímače zrychlení. Následný výzkum s těmito typy senzorů může vést k dalšímu zlepšení jízdních vlastností vozidla, hlavně ke stabilizační funkci vozidla.

---

## Použitá literatura

- [1] Robert Bosch GmbH. *Automotive Handbook*. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2007. 7th edition. 1192 str. ISBN 978-0-8367-1540-0
- [2] Vlk, František. *Koncepce motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2000. 367 str. ISBN 80-238-5276-0.
- [3] Kiencke, K., Nielsen, L. *Automotive Control Systems*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 512 str. 2nd edition. ISBN 3-540-23139.
- [4] Rajamani, R. *Vehicle Dynamics and Control*. London: Springer New York Dordrecht Heidelberg, 2012. 492 str. e-ISBN 978-1-4614-1433-9
- [5] Svoboda, Jiří. *Planetové Převody*. Praha: Vydavatelství ČVÚT, 1998. 90 str. ISBN 80-0103-245-0.
- [6] Moravec, Vladimír. *Mechanické a hydraulické převody*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-807-0.
- [7] Vlk, František. *Převody motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2006. 371 str. ISBN 80-239-6463-1.
- [8] Hrdina, Libor. Disertační práce. *Metody přímého řízení momentu asynchronních motorů*. Ostrava: 2008.
- [9] Brandštetter, P. *Střídavé regulační pohony*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-668-X.
- [10] Crowder, R. M. *Electric Drives and their Controls*. New York: Claredon Press, 1995. ISBN 0-19-859371-6.
- [11] Chmelík, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002. 135 str. ISBN 80-248-0025-X.
- [12] Neborák I., Sládeček V.: *Elektrické pohony*. Ostrava: VŠB-TUO, 2004. 123 str. ISBN 9788024814933.
- [13] Javůrek J.: *Regulace moderních elektrických pohonů*. 1.vydání, Praha: Grada Publishing, 2003. 264 s. ISBN 80-247-0507-9.
- [14] Brandstetter, P.; Simoník, P. *Signal processing for vector control of AC drive Radioelektronika, 2010 20th International Conference* , vol., no., pp.1-4, 19-21 April 2010. doi: 10.1109/RADIOELEK.2010.5478583
- [15] Brandstetter, P., Vanek J., Pumr J., Michalik J. *Microcomputer Control System for Industrial Electronics Applications*, 2009 Applied Electronics, International Conference, ISBN 978-80-7043-781-0.
- [16] Freescale. *CodeWarrior Development Studio for Freescale 56800/E Digital Signal Controllers: MC56F8xxx/DSP5685x Family Targeting Manual*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2006. <http://www.freescale.com>.
- [17] Freescale. *DSP56800E\_Quick\_Start User's Manual*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2007. <http://www.freescale.com>.
- [18] Virius, M. *Jazyky C a C++ kompletní průvodce*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. 367 str. ISBN 978-80-274-3917-5

- 
- [19] Freescale. *General Functions Library*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2011. <http://www.freescale.com>.
- [20] Freescale. *General Digital Filters Library*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2011. <http://www.freescale.com>.
- [21] Freescale. *Motor Control Library*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2011. <http://www.freescale.com>.
- [22] Freescale. *Advanced Control Library*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2011. <http://www.freescale.com>.
- [23] Freescale. *56F802x and 56F803x Peripheral Reference Manual*. [PDF] Texas: Freescale Semiconductor, 2007. <http://www.freescale.com>.
- [24] Robert Bosch GmbH. *CAN specification version 2.0*. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 1991. <http://www.gaw.ru/>.

---

## Publikační činnost

- [1] **Hudeček, P., Sobek, M., Palacký, P., Slivka, D.:** *Experimentální mikropočítačový řídicí systém, se signálovým procesorem TMS320F28335*, Bratislava: Spolok absolventov a priateľov FEI STU (EF SVŠT) v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1, **2009**, 40-42, Zväzom elektrotechnického priemyslu SR, EXPO CENTER a.s., ISSN 13-35-25-47
- [2] **Slivka, D., Palacký, P., Hudeček, P., Sobek, M.:** Řídicí jednotka pohonu vozidla s DSK Freescale 56F8037. In *Sborník konference, elektrické pohony a výkonová elektronika 2009*, Brno:Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT Brno, **2009**, s. 1-6, Siemens s.r.o., divize Automatizace a pohony, ISBN 978-80-214-3974-0
- [3] **Hudeček, P., Palacký, P., Sobek, M., Slivka, D., Sládeček, V.:** *Online Diagnostic and Control Unit of Vehicle Induction Motor Based on TMS320F28335 DSP*. In *EPE-PEMC 2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Skopje: Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies, **2010**, 66-71, SS. Cyril and Methodius university - FEIT, ISBN 978-1-4244-7854-5
- [4] **Palacký, P., Slivka, D., Sobek, M., Hudeček, P.:** *Využití digitálních signálových kontrolérů při řízení elektrických pohonů*. In *Časopis Elektrotechnika*, Brno, **2010** [<http://elektrotechnika.cz/cz/download/vyuziti-digitalnich-signalovych-kontroleru-pri-rizeni-elektrickych-pohonu-1/>]
- [5] **Slivka, D., Hudeček, P., Sobek, M., Palacký, P., Naivert R.:** A multipurpose control unit based on Freescale 56F8037 with implemented vector control of an induction motor. In *2010 International Conference on Applied Electronics Pilsen 2010*. Ed. Jiří Pinker, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, **2010**, vol. 2010, čís. 1, 241-244, University of West Bohemia, FEL - KAE, ISBN 978-80-7043-865-7
- [6] **Slivka, D.:** *Drive control and values visualisation with using Freemaster software*. In *WOFEX 2010*. Ed. Michal Krátký, Jiří Dvorský, Pavel Moravec, Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, **2010**, 116-121, ISBN 978-80-248-2276-1
- [7] **Palacký, P., Slivka, D., Hudeček, P., Sobek, M.:** Synergy of Control Units in Electric Vehicle. In *International Scientific Conference EPE 2011, Kouty nad Desnou*, Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Department of Electrical Power Engineering Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, **2011**, vol. 12, ISBN 978-80-248-2393-5
- [8] **Palacký, P., Hudeček, P., Slivka, D., Sobek, M.:** *Využití TMS320F28335 pro online estimaci parametrů asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče*. In *International Scientific Conference EPE 2011, Kouty nad Desnou*, Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Department of Electrical Power Engineering Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, **2011**, vol. 12., ISBN 978-80-248-2393-5
- [9] **Havel A., Vaculík P., Slivka D.** *Efficient Propulsion Structure with an Axial Flux Rotary Converter for HEV Drive Unit*. In *Journal: Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2012. Vol: 9 Issue: 3 Pages 136-142. ISSN 1804-3119

- 
- [10] **Palacký P., Slivka D., Vaculík P., Havel A.** *Electric Vehicle Control Units Communication*. In Journal: Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2012. Vol: 10 Issue: 1 Pages 17-21. ISSN 1804-3119

## Publikace na Web of Science

- [1] **Sládeček, V., Palacký, P., Slivka, D., Sobek, M.:** *Influence of Power Semiconductor Converters Setup on the Quality of Electrical Energy from Renewable Sources.*, Brno:, Brno, University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Commutations, Department of Electrical Power Engineering, 2010. Ed. Jiří Drápela, Jan Macháček, vol. 11 th, ISBN 978-80-214-4094-4
- [2] **Hudeček, P., Palacký, P., Slivka, D., Sobek, M., Sládeček, V.:** *An intelligent diagnostic unit of a drive*. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference 2010.. Ed. Jiří Drápela, Jan Macháček, Brno:Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2010, vol. 11th, 687-691, ISBN 978-80-214-4094-4
- [3] **Sládeček, V., Palacký, P., Slivka, D., Hudeček, P.:** *Operating Mode of Permanent Magnet Synchronous Generator*. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference. Ed. Jiří Drápela, Jan Macháček, Brno:Brno, University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Commucation, Department of Electrical Power Engineering, 2010, 4 p, ISBN:978-80-214-4094-4
- [4] **Sobek, M., Palacký, P., Hudeček, P., Slivka, D., Sládeček, V.:** *Asynchronous Motor Working as Generator with VSI using Flux Field Oriented Control*. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Ed. Jiří Drápela, Jan Macháček , Brno: Brno University of Technology Faculty of Electrical Engineering and Communication Department of Electrical Power Engineering, 2010, 817-822, ISBN 978-80-214-4094-4



---

## Řešené projekty

- **SGS projekt č. SP2012/126**  
Reverzibilní měniče pro akumulaci elektrické energie, člen řešitelského týmu 2012.
- **SGS projekt č. SP2011/103**  
Výzkum struktur subsystémů akumulace, člen řešitelského týmu 2011.
- **SGS projekt č. SP2010/114**  
Výzkum vybraných problémů mobilních servisních robotů, člen řešitelského týmu 2010.

## Funkční vzorky

- Řídicí systém se dvěma DSC Freescale 56F8037, 2010
- Modul galvanického oddělení USB portu 2.0, 2011